

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет  
Кафедра физики плазмы**



УТВЕРЖДАЮ  
Декан ФФ, д.ф.-м.н  
В.Е.Блинов  
2022 г.

**Рабочая программа дисциплины**

**ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УТС**

направление подготовки: **03.04.02 Физика**  
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения  
**Очная**

| Семестр  | Общий объем | Виды учебных занятий (в часах)                 |                      |                      |  | Промежуточная аттестация (в часах)                    |  |       |                          |         |
|--|-------------|--|----------------------|----------------------|--|---|--|-------|--------------------------|---------|
|  |             | Контактная работа обучающихся с преподавателем |                      |                      | Самостоятельная работа, не включая период сессии | Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации | Контактная работа обучающихся с преподавателем |       |                          |         |
|  |             | Лекции   | Практические занятия | Лабораторные занятия |  |   | Консультации                                   | Зачет | Дифференцированный зачет | Экзамен |
| 1  | 2           | 3  | 4                    | 5                    | 6  | 7   | 8  | 9     | 10                       | 11      |
| 2  | 108         | 32   | 16                   |                      | 38   | 18  | 2  |       |                          | 2       |
| Всего 108 часа /3 зачетные единицы<br>из них:<br>- контактная работа 52 часа<br>Компетенции ПК-1 |             |  |                      |                      |  |   |  |       |                          |         |

Руководитель программы

д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2022

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....   | 3  |
| 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы. ....   | 3  |
| 3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. .... | 4  |
| 4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. ....   | 5  |
| 5. Перечень учебной литературы. ....  | 11 |
| 6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ....  | 11 |
| 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....  | 13 |
| 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....   | 13 |
| 9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....  | 13 |
| 10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....  | 14 |

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Целями освоения дисциплины являются:

- знакомство с современными потребностями человечества в энергетических ресурсах, способах извлечения энергии, преимуществами, недостатками и ресурсами существующих способов извлечения энергии, экологической и социальной нагрузкой энергетики;
- изучение физических основ термоядерной энергетики, основных реакций термоядерного цикла в природе и в термоядерной энергетике, структуре термоядерного реактора, критерии Лоусона, экономических и экологических перспектив термоядерной энергетики;
- изучение основных подходов к достижению условий управляемого термоядерного синтеза, включая разновидности тороидальных ловушек, разновидности схем инерциального термоядерного синтеза, нетрадиционные подходы к УТС, параметры и достижения крупнейших плазменных установок, перспективы строительства опытного реактора;
- знакомство с новыми проблемами и решениями плазменных технологий и физики высокотемпературной плазмы, типичными для данной отрасли знаний;
- знакомство с принятыми в научном сообществе способами представления полученных результатов.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

| Результаты освоения образовательной программы (компетенции)  | Индикаторы  | Результаты обучения по дисциплине   |
|--|---|---|
| <p><b>ПК-1</b> Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> | <p><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p><b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> | <p><b>Знать</b> методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области физики плазмы, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований.</p> <p><b>Уметь</b> применять изученные модели и методы для нахождения решения простых задач по физике плазмы.</p> <p><b>Владеть</b> навыками самостоятельной работы с учебной литературой по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу; основной терминологией и понятийным аппаратом физики плазмы; методами определения свойств плазмы по заданным основным параметрам.</p> |

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Дополнительные главы теории плазмы» реализуется в осеннем семестре 1-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики плазмы. Курс предлагается к изучению после того, как студенты освоят основные теоретические курсы по физике плазмы и по технике плазменного эксперимента. В результате

изучения курса обучаемые должны овладеть знаниями в области современных исследований по проблеме управляемого термоядерного синтеза, в том числе овладеть новой терминологией и системой понятий. Знание материала данного курса является важным для большинства выпускников Кафедры физики плазмы НГУ (а именно, тех из них, которые планируют продолжать научную карьеру в базовом институте кафедры – ИЯФ СО РАН или в одном из зарубежных центров термоядерных исследований), поскольку позволяет соотносить результаты собственной научно-исследовательской работы с общей логикой, потребностями и уровнем исследований, ведущихся в мире по близким тематикам.

Для успешного освоения материала курса обучаемые должны полностью освоить не только основные общефизические и математические курсы (механику, электродинамику, атомную физику, физику сплошных сред, специальную теорию относительности, физику атомов и молекул, основные операции векторного и тензорного анализа в декартовой, цилиндрической и сферической системах координат), но и специальные курсы по физике плазмы, изучаемые в рамках выбранной специализации (основы физики плазмы, магнитную гидродинамику, волны и колебания в плазме, технику плазменного эксперимента, методы диагностики плазмы).

Таким образом, оценивая место курса в системе профессиональной подготовки, следует считать данный учебный курс одной из тех дисциплин (наряду с курсами «Плазменные технологии», «Плазма в космосе», «Открытые ловушки»), которые интегрируют накопленный за время обучения комплекс физических и математических знаний по разным дисциплинам и доводят знания и умения выпускника магистратуры до состояния, позволяющего ему после защиты магистерской диссертации легко включиться в научно-исследовательскую деятельность по специальности

### 3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

| Семестр  | Общий объем | Виды учебных занятий (в часах)                 |                      |                      |  | Промежуточная аттестация (в часах)                    |  |       |                          |         |
|--|-------------|--|----------------------|----------------------|--|---|--|-------|--------------------------|---------|
|  |             | Контактная работа обучающихся с преподавателем |                      |                      | Самостоятельная работа, не включая период сессии | Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации | Контактная работа обучающихся с преподавателем |       |                          |         |
|  |             | Лекции   | Практические занятия | Лабораторные занятия |  |   | Консультации                                   | Зачет | Дифференцированный зачет | Экзамен |
| 1  | 2           | 3  | 4                    | 5                    | 6  | 7   | 8  | 9     | 10                       | 11      |
| 2  | 108         | 32   | 16                   |                      | 38   | 18  | 2  |       |                          | 2       |
| Всего 108 часа /3 зачетные единицы<br>из них:<br>- контактная работа 52 часа<br>Компетенции ПК-1 |             |  |                      |                      |  |   |  |       |                          |         |

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: контроль посещения лекций, подготовка реферата.

- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 38 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа;

Объем контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 52 часа.

#### 4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Дисциплина «Инженерно-физические проблемы УТС» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 1-м курсе магистратуры физического факультета НГУ во 2-м семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачётные единицы, 108 академических часов.

| № п/п | Раздел дисциплины  | Неделя семестра | Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах) |                 |                      |   |   | Промежуточная аттестация (в период сессии) (в часах) |
|-------|--|-----------------|--|-----------------|----------------------|---|---|--|
|       |  |                 | Всего  | Аудиторные часы |                      | Сам. работа во время занятий (не включая период сессии) | Сам. работа во время промежуточной аттестации |  |
|       |  |                 |  | Лекции          | Практические занятия |   |   |  |
| 1     | 2  | 3               | 4  | 5               | 6                    | 7   | 8   | 9  |
| 1     | Классическая энергетика и необходимость реализации управляемого термоядерного синтеза. | 1-3             | 15   | 6               | 3                    | 6   |   |  |
| 2     | УТС на основе тороидальных магнитных систем  | 4-10            | 37   | 14              | 7                    | 16  |   |  |
| 3     | Другие подходы к УТС   | 11-16           | 34   | 12              | 6                    | 16  |   |  |
| 4     | Групповая консультация   |                 | 2  |                 |                      |   |   | 2  |

|              |                       |  |            |           |           |           |           |          |
|--------------|-----------------------|--|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 5            | Подготовка к экзамену |  | 18         |           |           |           | 18        |          |
| 6            | Экзамен               |  | 2          |           |           |           |           | 2        |
| <b>Всего</b> |                       |  | <b>108</b> | <b>32</b> | <b>16</b> | <b>38</b> | <b>18</b> | <b>4</b> |

### Программа и основное содержание лекций (32 часа)

#### Классическая энергетика и необходимость реализации управляемого термоядерного синтеза. (6 часов)

|  |
|--|
| <p><b>Введение.</b> Плазма в нашей жизни. Типичные параметры плазмы. Физические предпосылки для УТС. Основные центры т/я исследований. Плазма в астрофизике. Плазма в промышленности. Военная плазма. Направления работ по УТС. Содержание курса. Литература.</p>  |
| <p><b>Энергетика и экология.</b> Управляемый термоядерный синтез. Уровень жизни в разных странах. Зависимость ВВП от энергетики. Много ли энергии потребляется сегодня? Источники энергии. Источники загрязнения и энергозатраты. Мировое потребление энергии. Структура первичной энергии. Доля альтернативной энергетики. Мировые ресурсы нефти и газа. Изменение глобальной температуры. Локально может и похолодать! Изменение состава атмосферы. Хватит ли альтернативной энергетики?</p>   |
| <p><b>Ядерная энергетика.</b> Мировая ядерная энергетика. Доля ядерной энергетики. Атомная энергетика России. Строящиеся реакторы. Основы ядерной и Т/Я энергетики. Физика работы реактора. Сечение деления урана нейтронами. Ядерное топливо, топливный цикл. Ресурсы ядерного топлива. Схема воспроизводства топлива. Радиоактивные отходы энергетики. Дозовая нагрузка на человека. Риск аварий со смертельным исходом. Шкала ядерных аварий INES (МАГАТЭ). Оценка степени риска. Судьба радиоактивных отходов. Природные ядерные реакторы. Природный реактор Окло (Габон). Политика по отработанному топливу. Хранилище Yucca Mountain (Невада, США). Повышение безопасности реакторов.</p>  |
| <p><b>Физика термоядерных реакций.</b> Преимущества УТС как источника энергии. Термоядерные реакции – определение. Энергия связи в ядрах. Выбор подходящих реакций. Потенциальная энергия взаимодействия. Основные термоядерные реакции. Реакции термоядерной энергетики. Другие важные реакции. Зависимость сечения от энергии. Скорость реакции от температуры. Эффективность различных реакций. Реакции на Солнце - водородный цикл. Водородный цикл – продолжение. Реакции в звездах - углеродный цикл. Горение гелия в звездах. Образование тяжелых ядер в звездах. Топливо для термоядерной энергетики. Производство трития в blankets. Почему именно плазма? Критерий Лоусона. Баланс энергии в реакторе. Энергетическое время жизни <math>\tau_E</math>. Принципы удержания плазмы. Критерий Лоусона для инерциального УТС. Типовая структура термоядерного реактора. Коэффициент плазменного усиления Q. Альтернативные термоядерные топлива. Реакция <math>D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p</math>. Реакция <math>p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He}</math>. Относительная эффективность реакций. Энерговыведение в заряженных частицах. Мощность излучения примесей. Экологические аспекты т/я энергетики. Стоимость термоядерной энергии. Структура стоимости т/я энергии. Радиоактивность термоядерной станции. Зачем нужна термоядерная энергия?</p> |

#### УТС на основе тороидальных магнитных систем (14 часов)

|   |
|---|
| <p><b>Магнитное удержание плазмы. Токамаки.</b> Удержание плазмы в магнитном поле. Элементы тороидальной геометрии. Роль магнитного поля. История работ по токамакам. Каков прогресс за эти</p> |
|---|

годы? Прогресс в удержании плазмы (токамаки). Токамаки мира – расположение. Развитие линии классических токамаков. Токамак JET (Culham, UK - EU до 1999). Токамак TFTR (Princeton, USA). Токамак JT-60U (Naka, Japan). Токамак D-III-D (General Atomics, San Diego, USA). Токамак Tore Supra (Cadarache, France). Tore Supra - двухминутный разряд. Токамак T-15 (Курчатовский институт). Токамак EAST (Китай, T-7 -> HT-7 -> EAST). Токамак KSTAR (Daedjeon, Корея, с 2008). Токамак SST1 (Индия). Прогресс - взгляд из начала 1980-х годов. Что было бы, если... Токамак – основные части. Элементы конструкции токамака T-15. Токамак TCV (Vareenna, Швейцария). Управление формой плазмы на TCV. Движение частицы в токамаке. Понятие магнитной поверхности. Магнитные поверхности токамаков. Магнитные острова. Подготовка магнитной системы. Сценарий проведения разряда. Фазы подъема и прекращения тока. Омический нагрев плазмы. Радиальный профиль плазмы. Универсальный профиль давления. Модель “кучи песка” (токамак CASTOR). Тиринг-моды на JET. Тиринг-моды на TCV. Пилообразные колебания. Пилообразные колебания – геометрия. Пилообразные колебания – эволюция. Пилообразные колебания – томография. Пилообразные колебания - магнитные поверхности. Пилообразные колебания – моделирование. Срывы в токамаках. Большой срыв в T-10. Большой срыв на JET. Финальная фаза срыва (Alcator-C).

**Лимитеры и диверторы.** Процессы на границе плазмы со стенкой. Реальная плазма и реальная стенка. Контакт плазмы со стенкой в тороидальных системах. Работа лимитера в плазме. Диверторы - новые термины. Первый дивертор. Магнитные системы диверторов. Эволюция дивертора на JET. Пристеночная плазма в диверторе. Изотопы водорода в пристеночной плазме. Свечение водорода в диверторной плазме. Примеси в пограничном слое. MARFE. Топология MARFE. Графит как материал первой стенки. “Цветение графита” (carbon bloom). Эрозия графитовых пластин на D-III-D. Управление положением SOL на пластинах. Параметры диверторной плазмы. Требования к дивертору ИТЭР. Режимы работы (для тепловых потоков ИТЭР). Отрыв плазмы от дивертора (detachment). Отрыв плазмы от дивертора на JET. Излучение плазмы SOL (ASDEX, впрыск Ne). Эргодический дивертор - Tore-Supra. Эргодический дивертор – результаты. Динамический эргодический дивертор. Эргодический дивертор – TEXTOR. DED TEXTOR – картинки. Достигнутые потери на переизлучение. Нагрев и эрозия диверторных пластин. Физические проблемы для ИТЭР (контроль потоков мощности и частиц). Конструкции диверторных пластин. Прогресс технологии диверторов. Пути повышения тепловой нагрузки.

**Системы дополнительного нагрева.** Зачем нужен дополнительный нагрев? Методы дополнительного нагрева. Все методы дополнительного нагрева. Адиабатический нагрев - проект ТСП (T-14). Первые результаты по ЭЦР нагреву - ТМ-3. Результаты ЭЦР на T-10. Гиротроны (Нижний Новгород). Модовая структура мощных гиротронов. Комплекс ЭЦР нагрева на D-III-D. Ограничение мощности прочностью окна. Алмазное окно гиротрона. Нагрев на заданной магнитной поверхности. Демонстрация поддержания тока ECCD. Нижнегибридный резонанс. Поглощение волн при LHCD. Оборудование для LHCD. Ионно-циклотронный нагрев. Физика ИЦР нагрева. ИЦР: конверсия мод. ИЦР нагрев на токамаке PLT (США). Источники излучения для ИЦР. ИЦР нагрев на Tore-Supra. ИЦР нагрев на JET. Нагрев пучками нейтральных атомов. Схема нейтральной инжекции. Ионный источник установки D-III-D. Нагрев нейтральными пучками на JET. Нагрев нейтральными пучками на JT-60U. JT-60U: отрицательные ионы. Источник с отрицательными ионами - JT-60U. Отрицательные ионы на JT-60. Дополнительный нагрев для ИТЭР.

**Режимы с улучшенным удержанием в токамаках.** Скейлинг для L-моды. Скейлинг для L-моды токамаков. H-мода - режим с улучшенным удержанием. Новый радиальный профиль параметров. Переход L-H на токамаке DIII-D. Длинноимпульсный разряд с H-модой в DIII-D. L-H переход: эволюция профиля плотности. Возникновение барьера при H-моды. Электрическое поле и H-мода. Механизм и инициация H-моды. Скейлинг для H-моды токамаков. Нелинейные задачи с бифуркацией (попытка объяснить L-H переход). Типы ELM (JET). Зависимость энергии ELM от их частоты. Управление типом ELM. Влияние треугольности плазмы (JT-60). PВероятный механизм формирования ITB. Разряд с эквивалентным  $Q=1.25$  на JT-60. ITB и разный профиль шира. Supershot - улучшенное удержание на TFTR. Удержание в режиме “supershot” на TFTR. Профили  $q$  в TFTR. RI-мода на токамаке TEXTOR (напуск неона на периферию). Чисто омическая

|  |
|--|
| <p>Н-мода с ИТВ. Проблема режимов с ИТВ.</p> <p><b>Эксперименты с D-T плазмой.</b> Краткая история D-T экспериментов. Краткая история проекта TFTR. Работа с тритием в режиме “supershot”. Перенос у быстрых частиц меньше. Неустойчивость альфвеновских мод в TFTR. Возбуждение TAE - теория и эксперимент. МГД-активность и альфа-частицы в TFTR. TFTR - основные результаты. Тритиевые технологии на JET. Предварительные эксперименты на JET. Плазма с большой долей трития. JET: зависимость мощности L-H перехода от A. Скейлинги для энергетического времени жизни. Разряды с D-T: рекордная мощность. Разряды с D-T: квазистационарное горение. Нагрев а-частицами и зависимость от доли T. Лучшие D-T результаты JET и TFTR.</p>  |
| <p><b>Сферические токамаки.</b> Варианты тороидальной геометрии. Что такое “сферический токамак”? Особенности сферических токамаков. Магнитные поверхности (NSTX). Сферические токамаки мира. Токамак START (Culham, UK). Параметры токамаков START и MAST. START: разряды с Н-модой. START - энергетическое время жизни. Предельное давление плазмы – START. Схема и параметры NSTX. Внешний вид NSTX. NSTX - разряд с Н-модой. МГД-активность в сферическом токамаке. NSTX: неиндуктивное начало разряда. Инжекция спиральности. ВЧ нагрев и поддержание тока ВЧ нагрев плазмы на NSTX. Контроль профиля тока - удержание лучше. Параметры в режиме с хорошим удержанием. NSTX - основные результаты. MAST - установка и параметры. Формирование плазмы в MAST. Управление формой плазмы в MAST. Плазма в MAST – удержание. Томсоновское рассеяние в MAST. Плазма в MAST – диагностики. Н-мода и режимы с ИТВ в MAST. Стабилизация пилообразных колебаний. Выяснение природы ELM в MAST. Динамика ELM в MAST. ГЛОБУС-М (ФТИ им.Иоффе, С-Пб). Н-мода на Глобус-М. Нагрев нейтральными пучками на Глобус-М. ИЦР нагрев на Глобус-М. Глобус-М - основные результаты.</p>                                      |
| <p><b>Проект ИТЭР.</b> Как построить т/я реактор? Скейлинг для Н-моды токамаков. Новые крупные физические установки. Проекты установок следующего поколения. Цели трех проектов различаются. Проект IGNITOR. Проект FIRE. Проект ИТЭР. Краткая хронология проекта ИТЭР. Официальные цели проекта ИТЭР. Сценарии работы ИТЭР. Расчетная динамика параметров. Радиальные зависимости параметров. Ожидаемое значение Q. Ожидаемые параметры ITER-FEAT. Стационарная работа с Q=5. Принципы финансирования проекта. Структура управления проектом. Раскладка стоимости ITER-FEAT. Российский вклад в ИТЭР. Отработка технологий ИТЭР. Катушки тороидального поля ИТЭР. Сверхпроводник для ИТЭР (Инст. Бочвара). Прототип центрального соленоида. Вакуумная камера ИТЭР. Криостат ИТЭР. Первая стенка и бланкет. Система замены элементов бланкета. Конструкция дивертора. Отработка технологий для дивертора. Проблемы диагностик ITER. Здание для ITER (с тритиевым комплексом). Рабочая площадка ИТЭР. Безопасность и работа с тритием. Место строительства ИТЭР (Кадараш). Tore-Supra и ITER. Текущий вид площадки ИТЭР. График строительства. График экспериментов. ИТЭР и дальше: планы. ITER и другие.</p> |
| <p><b>Стеллараторы.</b> Идея стелларатора. Классические стеллараторы. Торсатрон/Гелиотрон. Гелиак. Стелларатор С (Принстон, США). Стеллараторы и токамаки – конец 1960х. Как делались первые токамаки в США. Проблемы первых экспериментов. Сравнение с токамаками. Основные параметры стеллараторов. Модульные катушки стеллараторов. Стелларатор W-7AS (Германия, с 1988 г.). Параметры плазмы на W-7AS. Проект W-7X. W-7X - состояние работ. Стелларатор LHD (Нака, Япония). Внутри вакуумной камеры LHD. Плазма LHD (Нака, Япония). Лучшие достижения стеллараторов. LHD: разряды большой длительности. Параметры плазмы на LHD. Проект NSX (Wisc. Univ., USA). Пути развития стеллараторных конфигураций. Проект NCSX (США). Скейлинг для токамаков и стеллараторов. Токамаки и стеллараторы: достижения.</p>   |

#### Другие подходы к УТС (12 часов)

|  |
|--|
| <p><b>Пинч с обращённым полем (Reversed Field Pinch).</b> Пинч с обращённым полем. История работ по RFP. Предыстория – астрофизика. Действующие установки. Отрицательный эффект - стохастизация центра. Установка RFX (Падуя, Италия). Самоорганизация и поддержание</p> |
|--|

конфигурации RFP. Отрицательный эффект - синхронизация мод. Вращение синхронизированных мод. Pulsed Poloidal Current Drive. Quasi Single Helicity states. Активная стабилизация плазмы на RFP. Активная стабилизация – результаты. Установка MST (U.Wisc., Madison, USA). MST - вспышки плазменного динамо. Стохастичность магнитного поля. Поиск «правильного» профиля тока. Два подхода к RFP. Установка EXTRAP T2 (Alfven Lab., Швеция). Установка TPE-RX (Япония). Скейлинг для RFP. Сравнение RFP и токамаков одного размера. Задачи следующего этапа для RFP.

**Инерциальный термоядерный синтез.** Инерциальное удержание плазмы. Условие зажигания мишени. Структура «инерциальной» электростанции. Параметры плазмы для лазерного УТС. Драйверы для инерциального УТС. Геометрия прямого сжатия мишени. Стадии сжатия мишени. Стадия ускорения и сжатия мишени. Стадия термоядерного горения. Оптимальные режимы сжатия мишеней. Профилирование мощности нагрева. Пример влияния неустойчивости. Мишени для инерциального синтеза. Схема непрямого нагрева мишени. Термоядерное оружие. Военный УТС. Мишени для NIF. Проекты улучшенных мишеней. Идея концепции Fast Ignition.

**Лазерный термоядерный синтез.** Поглощение излучения мишенью. Лазеры: выбор длины волны. Установки лазерного термояда. Установка Omega (Rochester, USA). Мишени для Omega (схема прямого обжатия). Профилирование мощности нагрева. Что даёт профилирование мощности. Изменение когерентности спектра (Omega). Влияние когерентности на сжатие мишени. Лазер Nike (NRL, Вашингтон, США). Лазер Nike – конструкция. Лазер Nike – подробности. Установка «Искра-5» (ВНИИТФ, Саров). Установка GEKKO-XII (Осака, Япония). Схема непрямого нагрева мишени. Лазер Nova (Ливермор, США). National Ignition Facility (Ливермор, США). NIF - оптическая схема одного канала. NIF - мишенная камера. NIF – мишень (хольраум). NIF – фотографии. Начало работы NIF. Лазерная программа Франции. LMJ – подробности. Установка УФЛ-2М (ВНИИТФ, Саров). Плазменная фазовая пластина. Концепция Fast Ignition. Получение ультракоротких импульсов. Петаваттный лазер в ИПФ РАН. Fast Ignition на Gekko-12 – мишень. Fast Ignition на Gekko-12. Реакторные перспективы лазерного УТС. Лазеры с частотой повторения. Проект Fusion Test Facility. Модуль установки Fusion Test Facility. Проблемы мишенной камеры. Металлические зеркала скользящего падения. Мишенная камера с финальной оптикой.

**Синтез с пучками тяжёлых ионов.** Инерциальный синтез с тяжёлыми ионами. Поглощение тяжёлых ионов в веществе. УТС с тяжёлыми ионами – мишень. УТС с тяжёлыми ионами – реактор. Многоапертурные ускоряющие структуры. УТС с тяжёлыми ионами – проблемы. УТС с тяжёлыми ионами - прототипы (США). УТС с тяжёлыми ионами – ИТЭФ. УТС с тяжёлыми ионами - США в 2015 г. УТС с тяжёлыми ионами – GSI. УТС с тяжёлыми ионами - Fast Ignition. Тяжело-ионный УТС - Fast Ignition реактор.

**Быстрые Z-пинчи.** Многопроволочные системы для Z-пинчей. Поле параметров вблизи проволоки. Появление предшественника на оси. Двойные массивы - варианты поведения. Рентгеновская щелевая развёртка свечения. Коллапс двумерного массива. Двойные массивы – столкновение слоёв. Z – сравнение эксперимента и модели. Комплекс «Ангара-5-1» (Троицк, Моск. обл.). Другие российские установки. Установка Z (бывшая PBFA-II, Sandia, USA). Прогресс в импульсной мощности (Sandia). Установка Z – результаты. Импульс Z - незавершенные разряды в воде. Схемы обжатия мишени излучением пинча. Сжатие термоядерной мишени на Z. Первые эксперименты с dynamic Hohlraum. Перспективы и планы США и России. Модернизация установки Z. ZR – введена в строй 18.02.2008. Проект «Байкал». Статус и перспективы развития установок. Бумажный проект электростанции. Технологии. Сравнение мишеней NIF и Z-пинча X-1.

**Нетрадиционные подходы к УТС.** Направления работ по УТС. Тороидальные системы магнитного УТС. Сферомак – топология. Сферомак SSPX (LLNL, США). Сферомак SSPX – результаты. Конфигурация с обращённым полем. FRC – схема и установки. Системы FRC - статус и перспективы. Синтез на сталкивающихся пучках ионов. Левитирующий диполь - идея метода. Левитирующий диполь – удержание. Левитирующий диполь - установка LDX. Левитирующий диполь - первая плазма. Плазменный фокус. Плазменный фокус – ПФ-3 (РНИЦ КИ). Синтез с

замагниченной мишенью. Стеночное удержание плазмы – идея. Стеночное удержание - эксперимент (Саров). Стеночное удержание плазмы – США. Инерциальный синтез с лёгкими ионами.

### Программа практических занятий (16 часов)

#### Классическая энергетика и необходимость реализации управляемого термоядерного синтеза. (3 часа)

**Физика термоядерных реакций.** Основные термоядерные реакции. Реакции термоядерной энергетике. Другие важные реакции. Зависимость сечения от энергии. Скорость реакции от температуры. Эффективность различных реакций. Реакции на Солнце - водородный цикл. Водородный цикл – продолжение. Реакции в звездах - углеродный цикл. Горение гелия в звездах. Образование тяжелых ядер в звездах. Топливо для термоядерной энергетике. Воспроизводство трития в blankets. Почему именно плазма? Критерий Лоусона. Баланс энергии в реакторе. Энергетическое время жизни  $\tau_E$ . Принципы удержания плазмы. Критерий Лоусона для инерциального УТС. Типовая структура термоядерного реактора. Коэффициент плазменного усиления  $Q$ . Альтернативные термоядерные топлива. Реакция  $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$ . Реакция  $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He}$ . Относительная эффективность реакций. Энерговыведение в заряженных частицах. Мощность излучения примесей.

#### УТС на основе тороидальных магнитных систем (7 часов)

**Магнитное удержание плазмы. Токамаки.** Магнитное поле тороида. Поляризация плазмы. Появление радиального дрейфа. Как бороться с дрейфом наружу? Дрейф в винтовом тороидальном поле. Тороид с плазмой с точки зрения МГД. Вводим магнитное поле плазменного тока. Добавляем вертикальное магнитное поле. Поддержание равновесия плазмы. Предельный ток разряда. Устойчивость высших мод. Предельная плотность плазмы. МГД предел по давлению плазмы. Мягкий и жесткий предел по давлению. Пролетные и запертые частицы. Движение пролетных и запертых частиц. Неоклассическая диффузия в токамаках. Коэффициент неоклассической диффузии. Реальность и неоклассическая теория. Бутстрэп-ток. Неустойчивости - энергетический принцип. Tearing-mode (пересоединение силовых линий).

**Лимитеры и диверторы.** Снижение потока энергии на лимитер путем переизлучения. Снижение потока тепла переизлучением. Лимитер и дивертор - сравнение геометрии.

**Системы дополнительного нагрева.** Нагрев электромагнитными волнами. Показатель преломления плазмы с полем. Нагрев на электронной циклотронной частоте. Распространение обыкновенной волны. Распространение необыкновенной волны. Нагрев электронов при ЭЦР. Генерация тока при ЭЦР.

**Режимы с улучшенным удержанием в токамаках.** Режимы с отрицательным широм. Формирование транспортного барьера. Длительный разряд с отрицательным широм. Длительный разряд с неиндуктивным током.

**Эксперименты с D-T плазмой.** Источники нейтронного излучения. Определение времени жизни тритонов в TFTR. Изотопная зависимость для времени жизни. Орбиты альфа-частиц в TFTR. Потери альфа-частиц – классические. Торможение альфа-частиц классическое. Время жизни гелия в установке.

#### Другие подходы к УТС (6 часов)

|   |
|---|
| <b>Пинч с обращённым полем (Reversed Field Pinch).</b> Основные идеи. Роль плазменного динамо. Стандартный механизм поддержания тока - плазменное динамо.   |
| <b>Инерциальный термоядерный синтез.</b> МГД-неустойчивость сжатия. Затравки для МГД-неустойчивости. Типы возмущений (по номеру моды).  |
| <b>Лазерный термоядерный синтез.</b> Поглощение излучения мишенью.  |
| <b>Синтез с пучками тяжёлых ионов.</b> Поглощение тяжёлых ионов в веществе.   |
| <b>Быстрые Z-пинчи.</b> Формирование плазменного слоя. 3D структура схлопывающейся оболочки. Динамика взрыва отдельной проволоочки. Динамика схлопывания проволоочек. Динамика системы с $N \sim 100$ . |

### Самостоятельная работа студентов (56 часов)

| Перечень занятий на СРС                                      | Объем, час |
|--|------------|
| Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях | 16         |
| Подготовка реферата  | 22         |
| Подготовка к экзамену  | 18         |

#### 5. Перечень учебной литературы.

1. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. М.: Физматлит, 1961. 467 с. (5 экз.)
2. Франк-Каменецкий Д. А. Лекции по физике плазмы. 2-е изд Москва : Атомиздат, 1968 286с. : черт.(50 экз)
3. Н. Кролл, А. Трайвелпис. Основы физики плазмы / Под ред. А. М. Дыхне. М.: Мир, 1975. 527 с. (11 экз)
4. Арцимович Л. А., Сагдеев Р. З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979. 315 с. (17 экз.)
5. Лукьянов С. Ю., Ковальский Н. Г. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М.: МИФИ, 1997. 430 с., (11 экз)
6. Котельников И.А., Лекции по физике плазмы, Издательство БИНОМ, Москва, 2013, 384 с., ISBN 978-5-9963-1158-3 (24 экз.)

#### 6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в области физики плазмы, относящейся к тематике данного курса. Рост как экспериментальных достижений по увеличению основных параметров плазмы, так и развитие теоретических методов описания и предсказания поведения высокотемпературной плазмы в реальных условиях в основном связан с прогрессом техники плазменного эксперимента и успешной работой значительного количества экспериментальных установок, в том числе крупных и сверхкрупных. К сожалению, практически все эти работы делаются за пределами России, на современной зарубежной экспериментальной базе. Поэтому основные материалы, в том числе оригинальные исследования и обобщающие (в

том числе учебные) материалы в настоящее время выходят по большей части на английском языке.

В процессе обучения по данному курсу рекомендуется использовать в качестве основных два источника информации. Во-первых, это электронный конспект авторского курса лекций, который доступен магистрантам Кафедры физики плазмы НГУ во внутриинститутской сети ИЯФ СО РАН в директории с учебными материалами кафедры. На момент начала учебного года студентам доступна версия электронного конспекта, читавшегося в предыдущем учебном году. Обновлённая версия конспекта выкладывается на ту же страницу по завершении цикла лекций. Помимо этого, доступна специально отформатированная версия курса, предназначенная для использования в качестве заготовки для конспектирования обучающимися материала в ходе лекций (формат по 3 слайда на лист с полями для собственных заметок). Последняя существующая версия 2013 года состоит из 581 слайда. Данный курс лекций регулярно обновляется новейшими материалами, которые лектор получает по каналам обмена профессиональной информацией.

Вторым рекомендуемым обучающим материалом является уникальный англоязычный сборник «Fusion physics» объёмом 1158 страниц, написанный ведущими мировыми экспертами и охватывающий практически полностью программу данного курса. Этот сборник был издан МАГАТЭ в 2012 году, электронная версия распространяется бесплатно и не имеет ограничений по использованию.

1. В.В. Поступаев, Инженерно-физические проблемы УТС. Электронный конспект курса лекций. Новосибирск, 2013, 581 с.
2. Sheffield J. The physics of magnetic fusion reactors // *Reviews of Modern Physics*, 1994, v.66, p.1015-1103.
3. Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы. М.: ВИНТИ (начиная с 1979 г.)
4. Status Report on Controlled Thermonuclear Fusion // *Nuclear Fusion*, 1990, v.30.
5. ITER Physics Basis // *Nuclear Fusion*, 1999, v.39.
6. Ryutov D.D., Derzon M.S. and Matzen M.K. The physics of fast Z pinches // *Reviews of Modern Physics*, 2000, v.72, p.167.
7. Wesson J. The Science of JET. Culham, 2000. – электронная версия книги доступна по адресу <http://www.jet.efda.org/documents/wesson/scienceofjet.pdf>
8. Wesson J., Tokamaks, 4th ed. (Oxford Univ. Press, Oxford, 2011).

### Примеры тем рефератов

1. Основные достижения работ на токамаке JET за последние два года.
2. Основные достижения работ на токамаке JT-60U за последние два года.
3. Основные достижения работ на токамаке Tore Supra за последние два года.
4. Основные достижения работ на токамаке Asdex за последние два года.
5. Основные достижения работ на токамаке DIII-D за последние два года.
6. Основные достижения работ на токамаке MAST за последние два года.
7. Основные достижения работ на токамаке NSTX за последние два года.
8. Основные достижения работ на токамаке Глобус за последние два года.
9. Основные достижения работ на токамаке Kstar за последние два года.
10. Основные достижения работ на токамаке EAST за последние два года.
11. Состояние работ по сооружению токамака ИТЭР
12. Основные достижения работ на стеллараторе LHD за последние два года.
13. Состояние работ по сооружению стелларатора W-7X.
14. Основные достижения работ на лазерной установке NIF за последние два года.
15. Основные достижения работ на лазерной установке Omega за последние два года.
16. Основные достижения работ на лазерной установке Nike за последние два года.
17. Основные достижения работ на лазерной установке Firex за последние два года.

18. Основные достижения работ на быстром пинче Ангара-5 за последние два года.
19. Основные достижения работ на быстром пинче ZR за последние два года.
20. Основные достижения работ на пинчах с обращённым полем MST и RFX за последние два года.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

### **7.1 Современные профессиональные базы данных**

Не используются

### **7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## 10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

### 10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

#### *Текущий контроль*

Текущий контроль осуществляется путем контроля посещения лекций. Студентам необходимо подготовить реферат по тематике пройденного материала.

#### *Промежуточная аттестация*

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области инженерно-физических проблем УТС в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

| Индикатор  | Результат обучения по дисциплине   | Оценочные средства           |
|--|--|------------------------------|
| <b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. | <b>Знать</b> методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области физики плазмы, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований.   | Подготовка реферата, экзамен |
| <b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.                     | <b>Уметь</b> применять изученные модели и методы для нахождения решения простых задач по физике плазмы.<br><b>Владеть</b> навыками самостоятельной работы с учебной литературой по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу; основной терминологией и понятийным аппаратом физики плазмы; методами определения свойств плазмы по | Подготовка реферата, экзамен |

|  |                              |  |
|--|------------------------------|--|
|  | заданным основным параметрам |  |
|--|------------------------------|--|

## 10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Инженерно-физические проблемы УТС».

Таблица 10.2

| Критерии оценивания результатов обучения | Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций) | Уровень освоения компетенции   |   |  |   |
|--|---|--|---|--|---|
|  |   | Не сформирован (0 баллов)  | Пороговый уровень (3 балла)   | Базовый уровень (4 балла)  | Продвинутый уровень (5 баллов)  |
| 1  | 2   | 3  | 4   | 5  | 6   |
| Полнота знаний                           | ПК 1.1  | Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.   | Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок. | Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы. | Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы. |
| Наличие умений                           | ПК 1.2  | Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.                                | Продemonстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.                                 | Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.   | Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.                                     |
| Наличие навыков (владение опытом)        | ПК 1.2  | Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок. | Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.                                      | Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.   | Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продemonстрированы знания по решению нестандартных задач.   |

### 10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### Примеры тем рефератов

(каждая тема дается только один раз, использованные темы исключаются из списка)

1. Исследования по тематике магнито-инерциального термоядерного синтеза в США
2. Концепция Z-пинча со стабилизацией сдвиговым течением
3. Развитие технологий производства мишеней для инерциального УТС
4. Работы по литиевой первой стенке в компании Tokamak Energy
5. Состояние работ по сферическому токамаку EXL-50
6. Проект японского реактора-стелларатора FFHR
7. Проекты токамаков-реакторов с сильным полем SPARC, ARC
8. Физические задачи и особенности японского лазерного проекта J-EPoCH
9. Использование алгоритмов машинного обучения для анализа данных в установках магнитного удержания
10. Использование сингулярного разложения для идентификации плазменных колебаний в токамаках
11. Работы по технологии мощных импульсных ArF лазеров в NRL
12. Прогресс в работах по лазерному УТС на National Ignition Facility
13. Работы по плазменной тематике в компании Commonwealth Fusion Systems
14. Режим I-mode на токамаке Alcator C-mod
15. Первые результаты с токамака NSTX-U

#### Перечень вопросов на экзамен

Каждый билет содержит по одному вопросу из разделов 1, 2 и 3. Нумерация вопросов в перечне не совпадает с нумерацией билетов.

#### Раздел 1. Физика токамаков

- 1.1. Удержание плазмы в тороидальном магнитном поле. Вращательное преобразование. Магнитные поверхности и магнитные острова.
- 1.2. Токamak. Устройство, основные физические принципы.
- 1.3. Предельный ток в токамаке. Запас устойчивости по Крускалу-Шафранову. Шир магнитного поля. Резонансные поверхности.
- 1.4. Поддержание равновесия плазмы в токамаке. Влияние формы плазмы на удержание.
- 1.5. Омический нагрев плазмы в токамаке. Канонические профили плотности, температуры и давления.
- 1.6. Предельная плотность плазмы в токамаке.
- 1.7. Предел по давлению плазмы в токамаке.
- 1.8. Пролетные и запертые частицы в токамаке. Типы траекторий.
- 1.9. Неоклассическая диффузия в токамаках. Роль турбулентности для процессов переноса.
- 1.10. Продолжительность существования плазмы в токамаке. Бутстрэп-ток. Неиндуктивные методы поддержания тока.
- 1.11. Основные типы неустойчивостей в плазме токамаков (общая характеристика).
- 1.12. Пилообразные колебания в токамаках.
- 1.13. Неустойчивость срыва в токамаках.
- 1.14. Процессы на стенке. Методы получения чистой плазмы. Пристеночная плазма.
- 1.15. Лимитеры (основные типы, принципы работы, результаты).
- 1.16. Диверторы (основные типы, принципы работы, результаты). Понятие SOL.

- 1.17. Неустойчивость периферийной плазмы (MARFE).
- 1.18. Понятие скейлинга. H-мода (получение, особенности). L-H переход. Скейлинги L- и H-моды.
- 1.19. Моды, локализованные на краю (ELM).
- 1.20. Понятие внутренних транспортных барьеров. Режимы с улучшенным удержанием в токамаках.

## **Раздел 2. УТС с магнитным удержанием плазмы**

- 2.1. Условия осуществимости УТС. Критерий Лоусона для систем с магнитным и инерциальным удержанием. Понятие Q.
- 2.2. Понятие термоядерной реакции, характеристика основных реакций для УТС.
- 2.3. "Безнейтронные" термоядерные реакции, их характеристика и особенности использования для УТС.
- 2.4. Термоядерные реакции в звездах.
- 2.5. Методы дополнительного нагрева плазмы в системах с магнитным удержанием. Адиабатический нагрев.
- 2.6. Методы ВЧ нагрева плазмы. Антенны.
- 2.7. Нагрев плазмы пучками частиц. Инжекторы с положительными и отрицательными ионами.
- 2.8. Эксперименты с D-T плазмой. Основные результаты.
- 2.9. Физика альфа-частиц в плазме. Роль альфа-частиц. Неустойчивости альфа-частиц.
- 2.10. Проекты установок следующего поколения. Физические задачи.
- 2.11. Сферические токамаки. Физические принципы, преимущества и недостатки концепции.
- 2.12. Действующие сферические токамаки. Основные установки и результаты.
- 2.13. Стеллараторы. Основные физические принципы. Магнитные системы. Действующие установки и результаты.
- 2.14. Тороидальный пинч с обращенным полем. Основные идеи. Поддержание конфигурации магнитного поля.
- 2.15. Тороидальный пинч с обращенным полем. Действующие установки, основные результаты.
- 2.16. Перенос в тороидальных пинчах с обращенным полем. Техника PPCD.
- 2.17. Сферомак. Магнитная конфигурация. Устройство установок. Результаты.
- 2.18. Системы с обращенным полем (FRC). Магнитная конфигурация. Экспериментальные результаты.
- 2.19. Удержание в магнитном поле диполя. Принципы работы. Результаты.
- 2.20. Инженерные проблемы реакторов и способы их решения (первая стенка, дивертор, воспроизводство трития, стационарное горение).

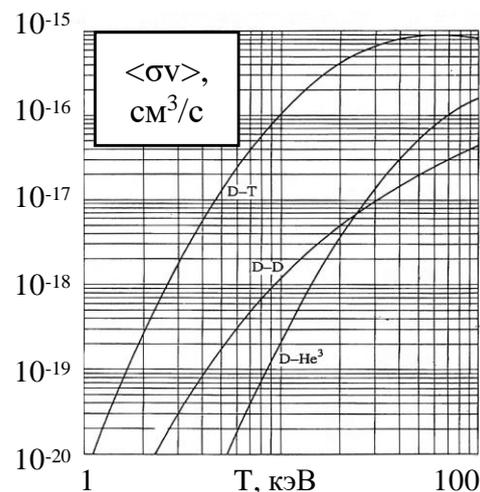
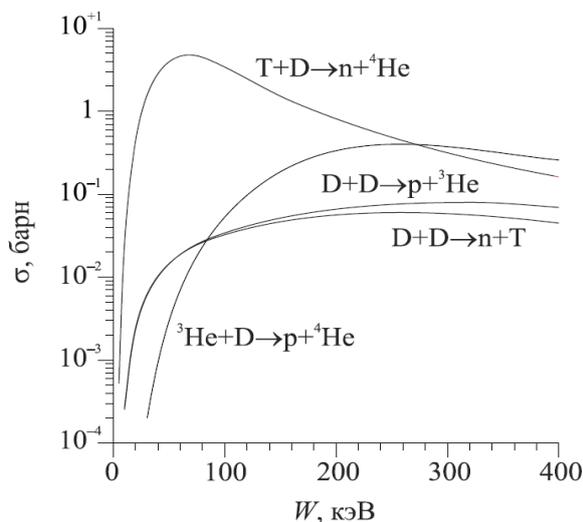
## **Раздел 3. Инерциальный УТС**

- 3.1. Основные принципы инерциального УТС, диапазон параметров, критерий Лоусона. Физические проблемы. Типы драйверов, оценка требуемой энергетики.
- 3.2. Устройство лазеров для инерциального УТС. Примеры установок с лазерами на стекле. Выбор длины волны, длительности, однородности.
- 3.3. Схема прямого обжата мишени в лазерном УТС. Конструкция мишеней. Роль МГД неустойчивостей.
- 3.4. Уменьшение когерентности лазерного излучения. Принципы и результаты.
- 3.5. Схема с профилированием мощности лазерного импульса. Основные принципы и результаты.
- 3.6. Газовые лазеры для инерциального УТС. Примеры установок, их устройство, характерные параметры.
- 3.7. Схема непрямого обжата мишени в лазерном УТС. Физические принципы. Конструкция мишеней.
- 3.8. Схема "быстрого зажигания". Основные принципы. Методы реализации. Результаты.
- 3.9. Принципы построения мегаджоульных лазеров для инерциального УТС.
- 3.10. Устройство короткоимпульсных лазеров для инерциального УТС.

- 3.11. Быстрые Z-пинчи как драйверы для инерциального УТС. Физические принципы. Экспериментальные результаты.
- 3.12. Простые многопроволочные системы. Характерные параметры установок, примеры реализации.
- 3.13. Динамика плазмы в простой многопроволочной системе. Перетекание вещества, прекурсор.
- 3.14. Двойные многопроволочные системы. Преимущества. Динамика плазмы в двойных системах. Примеры реализации.
- 3.15. Инерциальный УТС с тяжелыми ионами. Физические принципы. Конструкция мишеней.
- 3.16. Схемы построения ускорителей тяжелых ионов для УТС. Требуемые параметры. Экспериментальные достижения. Физические проблемы.
- 3.17. Схема "быстрого зажигания" для тяжелоионного УТС.
- 3.18. Схема стеночного удержания замагниченной плотной плазмы. Физические принципы. Результаты.
- 3.19. Системы "плазменный фокус". Физические принципы. Результаты.
- 3.20. Методы диагностики сверхплотной плазмы в экспериментах по инерциальному УТС.

### Примеры задач на экзамен

1. Тонкая длинная нить из твёрдого водорода помещена в продольное магнитное поле  $B$  (однородное и бесконечное). В момент  $t = 0$  через нить пропускается импульс тока так, что нить мгновенно превращается в горячую плазму. Начальное энерговыделение  $q$  эрг/см. Найти равновесный и максимальный радиусы плазмы. Чем определяется время затухания колебаний плазменной границы (дать качественный ответ)?
2. Какое магнитное поле требуется создать в установке для того, чтобы удерживать плазму с плотностью  $n = 10^{14}$  см $^{-3}$  и температурой  $T = 100$  кэВ, если параметр  $\beta = 0.01$ ? Чему равно давление такого магнитного поля (в атмосферах)?
3. Пучок атомов водорода с энергией 20 кэВ от ускоряющей структуры инжектора проходит через перезарядную кювету длиной 1 м, заполненную нейтральным водородом с давлением



1 Па, к которой приложено напряжение  $U = 1000$  В. Найти среднюю энергию, которую приобретут атомы водорода после прохождения через кювету. Принять сечение перезарядки  $\sigma_{\text{пер}} = 6 \cdot 10^{-16}$  см $^{-2}$ , ионизации  $\sigma_{\text{ион}} = 2 \cdot 10^{-16}$  см $^{-2}$ .

4. Поперёк тонкого шнура дейтериевой плазмы с  $T = 10$  кэВ и  $n = 10^{14}$  см $^{-3}$  инжектируется пучок быстрых атомов трития с энергией 100 кэВ и плотностью мощности 10 кВт/см $^2$ . Какие реакции будут идти в такой системе? Вычислить мощность каждой реакции из единицы объёма. Данные по сечениям реакций приведены на графиках.

5. Равнокомпонентная D-T плазма удерживается в магнитном поле 50 кГс, при этом  $\beta = 0.05$ . Вычислить максимальную мощность D-T реакции, которую можно получить в такой системе. При какой температуре плазмы она достигается? В одной реакции выделяется 17.6 МэВ, считать  $T_e = T_i$ . Данные по сечению реакции приведены на графике.
6. Найти плотность тока, необходимую для поддержания теплового баланса в водородной плазме с плотностью  $n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и температурой  $T = 1 \text{ кэВ}$ , имеющей энергетическое время жизни  $\tau_E = 1 \text{ мс}$ .
7. Плотность плазмы в некоей ловушке определяется по следующему способу: зондирующий СВЧ-импульс проходит сквозь плазму, отражается назад от рефлектора на противоположной стенке камеры и улавливается антенной, расположенной рядом с излучателем. Измеряется время пролёта импульса от излучателя до антенны. Плазма цилиндрическая с диаметром 90 см, диаметр камеры 120 см, частота  $f = 90 \text{ ГГц}$ . Найти время пролёта для  $n = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $n = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Какая плотность определяется, электронная или ионная?
8. В некоторой установке с водородной плазмой при помощи внешнего источника поддерживается температура ионов  $T_i = 10 \text{ кэВ}$ . Найти удельную мощность нагрева и температуру электронов (или разницу между температурами электронов и ионов), если известно, что плазма охлаждается только за счёт излучения. Плотность плазмы  $n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .
9. Внутри тороидального соленоида ( $R = 1 \text{ м}$ ,  $a = 0.1 \text{ м}$ ,  $B = 10 \text{ кГс}$ ) в вакууме поместили электрон с энергией 1 кэВ. Что, как и когда будет происходить с этим электроном? Зависит ли (и если да, то как) судьба электрона от начального направления вектора скорости и от точки, в которую поместили электрон?
10. Физикам потребовалось получить плазму со следующими свойствами. Плотность плазмы  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Функция распределения электронов близка к максвелловской с температурой 40 кэВ. Функция распределения ионов близка к максвелловской с температурой 10 кэВ. Можно ли получить такую плазму? Если да, то объясните физику процесса и вычислите время (в секундах), в течение которого такая плазма может существовать.
11. Найти равновесную долю быстрых нейтралов при прохождении пучка ионов с энергией 20 кэВ через перезарядную водородную мишень большой толщины. Принять сечение перезарядки  $\sigma_{\text{пер}} = 6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ , сечение ионизации  $\sigma_{\text{ион}} = 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ .
12. В магнитном поле 10 кГс удерживается плазменный столб с параметрами:  $T = 1 \text{ кэВ}$  и  $n = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Найти скачок магнитного поля на границе плазменного шнура.

### Пример экзаменационного билета

Билет 1.

1. Пролетные и запертые частицы в токамаке. Типы траекторий.
2. Физика альфа-частиц в плазме. Роль альфа-частиц. Неустойчивости альфа-частиц.
3. Схема прямого обжата мишени в лазерном УТС. Конструкция мишеней. Роль МГД неустойчивостей.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы  
по дисциплине «Инженерно-физические проблемы УТС»  
по направлению подготовки 03.04.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

| № | Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа) | Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ | Подпись ответственного |
|---|--|--|------------------------|
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |