

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ**

**НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Физический факультет  
Кафедра физики плазмы**

**ТЕХНИКА ПЛАЗМЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА  
(Программа учебного курса)**

Новосибирск

2012

Программа курса (дисциплины) «Техника плазменного эксперимента» составлена в соответствии с требованиями к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки дипломированного специалиста (бакалавра, магистра) по профессиональному циклу дисциплин (Б.3) по направлению «011200 Физика», а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Изучение дисциплины должно позволить студентам ориентироваться в номенклатуре технических средств, применяемых в экспериментальной физике плазмы, определять параметры технических систем разрабатываемых и модернизируемых физических установок, предлагать и обосновывать технические решения задач, возникающих при проведении экспериментальных исследований.

Автор

к.ф.-м.н. Полосаткин Сергей Викторович

Программа учебного курса подготовлена в рамках реализации Программы развития НИУ  
НГУ на 2009–2018 годы

© Новосибирский государственный  
университет 2012

## Программа учебного курса (учебной дисциплины)

Программа курса (дисциплины) «**Техника плазменного эксперимента**» составлена в соответствии с требованиями к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки дипломированного специалиста (бакалавра, магистра) по **профессиональному циклу дисциплин (Б.3)** по направлению «**011200 Физика**», а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ.

Автор (авторы) Полосаткин Сергей Викторович, к.ф.-м.н.

Факультет: **физический.**

Кафедра: **физики плазмы.**

### 1. Цели освоения дисциплины (курса)

Дисциплина (курс) «**Техника плазменного эксперимента**» имеет своей целью: дать учащимся набор сведений об устройстве и принципах создания исследовательских плазменных установок, их основных технических системах и элементах. Изучение дисциплины должно позволить студентам ориентироваться в номенклатуре технических средств, применяемых в экспериментальной физике плазмы, определять параметры технических систем разрабатываемых и модернизируемых физических установок, предлагать и обосновывать технические решения задач, возникающих при проведении экспериментальных исследований.

### 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Курс относится к циклу специальных дисциплин. Необходимыми предпосылками для успешного освоения курса являются: в цикле математических дисциплин - знание основ линейной алгебры, дифференциального и интегрального исчисления, методов математической физики, и умение применять эти знания при решении задач. Необходимость владения указанными математическими дисциплинами обусловлена тем обстоятельством, что значительная часть технических расчетов, необходимых для проектирования физической установки, сводится к решению дифференциальных уравнений (обычных или в частных производных).

В цикле общефизических дисциплин необходимыми предпосылками являются знание молекулярной физики, электродинамики и радиоэлектроники. Эти дисциплины необходимы для понимания процессов, лежащих в основе функционирования устройств вакуумной техники, магнитных и электростатических систем физических установок. Кроме того, для успешного освоения курса необходимо знание основ физики плазмы и физики газового разряда, изучаемых студентами кафедры физики плазмы в рамках соответствующих спецкурсов. Курс “Техника плазменного эксперимента” читается в заключительном семестре обучения по программе бакалавриата, полученные при изучении курса знания и компетенции используются студентами для выполнения квалификационной работы. Вопросы, рассматриваемые в курсе, более подробно изучаются в магистерской программе на кафедре физики плазмы в спецкурсах “Инженерно-физические проблемы УТС”, “Физика открытых ловушек”, “Мощные электронные и ионные пучки”.

### **3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины**

- общекультурные компетенции: ОК-1, ОК-3, ОК-4, ОК-6, ОК-7, ОК-12, ОК-3, ОК-14, ОК-16, ОК-17, ОК-20.
  - профессиональные компетенции: ПК-1 –ПК-6 , ПК-8.
- 

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- Знать: назначение, принципы построения и устройство систем питания, вакуумных систем, систем формирования магнитного поля, систем нагрева плазмы плазменных установок
- Уметь: выполнять оценки параметров технических систем плазменных установок
- Владеть навыками работы с системами моделирования электрических и магнитных полей, электротехнических схем

#### 4. Структура и содержание дисциплины

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)			Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра)
1	Общие вопросы подготовки и планирования эксперимента. Сооружение экспериментальной установки.	8	1	2 часа лекций			
2	История развития плазменного эксперимента.	8	1		Самостоятельная работа студентов с литературой, 4 часа		
3	Вакуумная техника.	8	2-3	4 часа лекций	Самостоятельная работа студентов, 2 часа		Контрольная работа по пройденному материалу (15 мин)
4	Системы газонапуска плазменных установок	8	4	1 час лекций			
5	Взаимодействие водорода с металлами. Применение систем металл-водород в физическом эксперименте	8	4	1 час лекций			
6	Системы создания плазмы. Типы газовых разрядов. Генераторы плазмы и плазменные пушки	8	5	2 часа лекций			Контрольная работа по пройденному материалу
7	Магнитные системы физических установок	8	6	2 часа лекций	Самостоятельная работа студентов, 2 часа		
8	Ключевые термоядерные программы, крупные плазменные установки.	8	7	2 часа интерактивных занятий	Самостоятельная работа студентов, 4 часа		Подготовка докладов
9	Системы питания плазменных установок, накопители энергии	8	8	2 часа лекций			
10	Техника высоких напряжений, высоковольтная импульсная техника	8	9	2 часа лекций	Самостоятельная работа студентов, 2 часа		Контрольная работа по пройденному материалу
11	Генерация электронных пучков	8	10	2 часа лекций			
12	Инжекторы пучков нейтралов для нагрева и диагностики плазмы	8	11	2 часа лекций			
13	Системы управления экспериментальными установками	8	12	2 часа лекций			
							Экзамен по курсу

## План лекций по курсу

1. Подготовка и планирование эксперимента, сооружение экспериментальной установки. Выбор задачи и физическое обоснование эксперимента. Выработка технических решений, проектирование установки. Организация производства, своевременный заказ уникального и дефицитного оборудования. Проектирование, сооружение и подготовка специальных помещений. Организация работы на крупной экспериментальной установке. Основные части плазменной установки. Пример сооружения плазменной установки в ИЯФ СО РАН
2. Вакуумная техника. Режимы течения газа. Методы расчета вакуумных систем. Общие характеристики вакуумных систем, требования к вакуумным системам термоядерных установок. Особенности конструкций вакуумных систем. Вакуумные материалы. Вакуумные камеры плазменных установок. Обезгаживание вакуумных поверхностей. Вакуумная гигиена.
3. Средства откачки, типы вакуумных насосов. Насосы предварительного разрежения (форвакуумные насосы). Высоковакуумные насосы: пароструйные, турбомолекулярные, магнитоэлектрические, сорбционные, криогенные. Техника измерения и контроля вакуума. Течеискатели, масс-спектрометрия остаточного газа
4. Системы газонапуска. Механические (игольчатые) натекатели. Тепловые (палладиевые) натекатели. Импульсные газовые клапаны, их разновидности. Подача плазменного "топлива" инъекцией таблеток.
5. Взаимодействие водорода с металлами. Энергетическая диаграмма водорода в металлах, параметры растворимости водорода. Сверхпроницаемость. Образование гидридов, предельная растворимость водорода, фазовая диаграмма образования гидридов. Система водород-титан, использование накопителей водорода в плазменном эксперименте.
6. Типы газовых разрядов. Искровой разряд, тлеющий разряд, дуга. Системы создания плазмы. Пеннингский разряд, отражательный разряд. Ионизация газа разрядным током, электронными пучками. Источники и генераторы плазмы. Плазменные пушки.
7. Методы формирования магнитных полей. Постоянные магниты, электромагниты, сверхпроводящие магниты. Формирование сверхсильных магнитных полей. Методы расчета магнитных полей. Измерение и контроль магнитного поля.
8. Системы питания плазменных установок. Общие требования и параметры. Использование промышленной сети для питания плазменных установок. Преобразователи и выпрямители напряжения. Накопители энергии. Емкостные накопители. Конденсаторы, их конструкции

и основные характеристики. Большие конденсаторные батареи, их компоновка, ошиновка. Индуктивные накопители, достоинства, конструктивные особенности. Сверхпроводящие накопители. Инерционные накопители. Ударные генераторы с маховиками. Униполярные генераторы. Мощные генераторы переменного тока.

9. Высоковольтная и импульсная техника. Применение высокого напряжения для ускорения частиц. Основные принципы построения высоковольтных систем, высоковольтная изоляция. Импульсная техника. Мегавольтные генераторы импульсных напряжений, формирующие и передающие линии, обостряющие системы. Системы коммутации: искровые и газовые разрядники, тиратроны, игнитроны, полупроводниковые коммутаторы.
10. Получение электронных пучков. Накаливаемые, взрывоэмиссионные, плазменные катоды. Вакуумные диоды для генерации электронных пучков. Применение мощных электронных пучков в плазменном эксперименте и технологиях.
11. Инжекторы мощных пучков нейтралов. Применение, физические схемы получения нейтральных пучков, основные элементы инжекторов. Системы питания нейтральных инжекторов.
12. Системы управления экспериментальными установками. Современные промышленные средства автоматизации. Стандарты передачи данных.

## **5. Образовательные технологии**

Основой курса является цикл лекционных занятий. При чтении лекций используются мультимедийные презентации, позволяющие наглядно объяснить и продемонстрировать принципы работы физического оборудования. Презентации включают в себя ссылки на использованные источники информации, так что студенты имеют возможность самостоятельного углубленного изучения предмета.

Основой преподавания на физическом факультете НГУ является тесная связь теоретических курсов с научно-исследовательской работой студентов в лабораториях. Одной из задач курса является знакомство студентов с техническими системами физических установок, на которых выполняется научно-исследовательская работа. Для решения этой задачи изложение всех разделов ведется с использованием примеров с действующих установок. Также, в рамках соответствующих тем излагается устройство вакуумной, газовой, магнитной, инжекционной систем токамака ИТЭР – крупнейшей строящейся плазменной физической установки, которая в ближайшее десятилетие будет являться лидером в работах по управляемому термоядерному синтезу.

Задания части самостоятельных контрольных работ составлены таким образом, что требуют от студента изучения и понимания работы технических систем установок, на которых он выполняет свою квалификационную работу.

Другая часть самостоятельных работ требует проведения численного моделирования вакуумных, магнитных и электротехнических систем. Основными целями этих заданий являются развитие профессиональных навыков работы с программами численного моделирования и закрепление полученных во время лекционных занятий знаний об устройстве технических систем.

Два раздела курса (история развития плазменного эксперимента и современные термоядерные программы) вынесены для самостоятельного изучения студентами. По первому из разделов в связи с 50-летием работ по управляемому термоядерному синтезу опубликовано большое количество исторических научно-популярных обзоров, которые могут быть использованы при самостоятельной подготовке. Второй раздел тесно связан с первым, однако вследствие его важности для лучшего усвоения информации на одном из занятий студентам предлагается подготовить доклады по основным направлениям термоядерной программы, с последующим интерактивным обсуждением.

Экзаменационные вопросы включают в себя один теоретический вопрос и одну задачу. При подготовке к ответу студентам разрешается пользоваться всей доступной информацией. Экзаменационные задачи представляют собой, по сути, кейсы (case) – практические ситуации, с которыми может столкнуться физик-экспериментатор при проведении исследований по физике плазмы. Предполагается, что студент должен за ограниченное время (несколько часов) найти необходимую для решения справочную информацию, сделать оценки физических параметров, предложить варианты решения поставленной задачи и обосновать выбор одного из вариантов.

Для оценки знаний студентов используется балльно-рейтинговая система, учитывающая посещение лекций и результаты контрольных работ, и позволяющая мотивировать студентов к самостоятельной работе в течение семестра.



**6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов**

**Вопросы для самостоятельной работы по теме “Вакуумная техника”:**

Обоснуйте возможность и целесообразность использования криосорбционных насосов на Вашей установке.

Опишите систему вакуумной откачки установки ИТЭР.

**Вопросы для подготовки сообщений по теме “Основные термоядерные программы”**

1. Токамаки. Принципы удержания плазмы, параметры плазмы в токамаках. Основные этапы развития токамаков в России и за рубежом.

2. Этапы развития программы токамаков в СССР / России.

3. Токамак ИТЭР. История создания, основные параметры, текущий статус

4. Стеллараторная программа. Принципы удержания плазмы, история создания, текущий статус. Действующие и проектируемые установки. Преимущества и недостатки стеллараторов по сравнению с токамаками.

5. Установки с обращенным полем. Отличие от токамаков, действующие установки

6. Пробкотрон Будкера-Поста. Принцип удержания плазмы, основные ограничения

7. Ловушки с минимумом В. Основные магнитные конфигурации. История создания ловушек с минимумом В

8. Амбиполярные ловушки. Принципы удержания плазмы, термоядерные перспективы амбиполярных ловушек

9. Ловушки с малой длиной свободного пробега. Основные принципы удержания плазмы. Газодинамическая и многопробочная ловушки.

10. Установка ГОЛ-3. Особенности нагрева и удержания плазмы

11. Инерциальный термоядерный синтез. Установки лазерного термоядерного синтеза.

12. Z-пинчи. Основные принципы работы. Параметры действующих установок.

### Задачи для контрольной работы по теме “Вакуумная техника”

1. Высоковакуумный насос имеет скорость откачки 500 л/с в диапазоне давлений  $10^{-2}$  –  $10^{-6}$  Па. Давление на выхлопе насоса должно составлять 1 Па. Найти требуемую скорость откачки форвакуумного насоса.
2. Стационарный ионный источник подключен к вакуумной камере объемом 10 л. Ток ионного источника 50 мА, газовая эффективность (доля газа, переведенного в ионы) 10%. Найти давление в вакуумной камере при ее откачке высоковакуумным насосом со скоростью откачки 300 л/с.
3. Вакуумная камера объемом 500 л откачивается с атмосферного давления до давления 1 Па форвакуумным насосом со скоростью откачки 250 л/мин. Найти время откачки вакуумной камеры.
4. В вакуумной камере поддерживается вакуум  $10^{-4}$  Па с помощью высоковакуумного насоса 500 л/с и форвакуумного насоса. Во определенный момент времени форвакуумная откачка прекращается. За какое время давление в форвакуумной магистрали повысится с 1 до 10 Па, если объем форвакуумной магистрали 1 л.
5. Вакуумный объем с рабочим вакуумом  $10^{-4}$  Па откачивается с помощью турбомолекулярного насоса со скоростью откачки 500 л/с. Определите массу поглотителя адсорбционного (цеолитового) насоса, необходимую для обеспечения форвакуумной откачки в течение рабочего дня (площадь поверхности поглотителя (цеолита)  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ )
6. Определить величину газового потока в вакуумный объем, если при скорости откачки 500 л/с давление в объеме составляет  $10^{-4}$  Па.
7. Вакуумный объем с потоком водорода  $0.1 \text{ ст. см}^3/\text{мин}$  откачивается насосом 100 л/с через трубку длиной 50 см и диаметром 2 см. Определить рабочее давление в вакуумном объеме
8. Вакуумный объем с рабочим вакуумом  $10^{-4}$  Па откачивается с помощью криосорбционного насоса со скоростью откачки 1000 л/с. Емкость насоса 10 ст. литров. Определите время работы насоса до его регенерации.

9. Вакуумный объем с поступлением водорода  $0.1 \text{ ст.см}^3/\text{мин}$  откачивается системой турбомолекулярный насос – форвакуумный насос. Параметры турбомолекулярного насоса – скорость откачки  $500 \text{ л/с}$ , степень сжатия по водороду  $1000$ . Форвакуумный насос –  $250 \text{ л/мин}$ , предельный вакуум  $1 \text{ Па}$ . Определить рабочий вакуум в вакуумном объеме.
  
10. Вакуумная камера имеет объем  $100 \text{ л}$ . Определить, при каком вакууме в камере можно начинать откачку камеры с помощью криосорбционного насоса с параметром включения  $10^4 \text{ Па*л}$
  
11. Вакуумный объем с потоком водорода  $0.1 \text{ ст.см}^3/\text{мин}$  откачивается насосом  $100 \text{ л/с}$  через диафрагму диаметром  $1 \text{ см}$ . Определить рабочее давление в вакуумном объеме
  
12. В установку с помощью импульсного клапана необходимо инжектировать  $10^{19}$  молекул водорода за  $10 \text{ мс}$ . Определить параметры клапана (условное отверстие и величину  $C_v$ ), необходимого для напуска газа.

## **Вопросы для контрольной работы по теме “Основные термоядерные программы”:**

1. Назовите четыре крупных действующих токамака.
2. Назовите действующие в России токамаки
3. Назовите основные центры термоядерных исследований в России
4. На каких установках проводились эксперименты с D-T плазмой?
5. Назовите место строительства токамака ИТЭР
6. Почему токамаки исторически позиционировались как импульсные установки? Можно ли реализовать режим непрерывной работы в токамаке?
7. Назовите действующие токамаки со сверхпроводящими катушками магнитного поля.
8. Что такое адиабатический нагрев плазмы? На каком токамаке предполагалось реализовать такой тип нагрева?
9. Чем определяется выбор материала для стенки вакуумной камеры в токамаке. Какие материалы предполагается использовать в реакторе ИТЭР?
10. Какие системы нагрева плазмы используются в термоядерных установках?
11. Каковы преимущества и недостатки стеллараторов по сравнению с токамаками?
12. Назовите три действующих или строящихся стелларатора.
13. Назовите действующие открытые ловушки.
14. Что представляет собой ловушка типа инь-янь? В чем основная идея использования такой конфигурации магнитного поля? Назовите установку с таким типом магнитного поля.
15. Назовите два способа формирования магнитного поля с минимумом В. В чем преимущества таких конфигураций по сравнению с простым пробкотроном?
16. Какова характерная длина пробега частицы (по сравнению с длиной установки) в амбиполярной, газодинамической и многопробочной ловушках?
17. Какие системы используются для нагрева плазмы на установках ГДЛ и ГОЛ-3?
18. Какие способы доставки энергии к термоядерной мишени рассматриваются в концепциях инерциального термоядерного синтеза?
19. За счет чего происходит сжатие и зажигание термоядерной мишени в оружейном термоядерном заряде?
20. Назовите крупнейшую строящуюся установку лазерного термоядерного синтеза. Лазеры какого типа используются на этой установке?
21. Чем отличаются системы прямого и непрямого сжатия мишеней лазерного термоядерного синтеза? Что такое хольраум?

22. Что такое Z-пинч? Назовите крупнейшую установку, на которой проводятся исследования возможности использования Z-пинча для инерциального термоядерного синтеза.

**Задачи для контрольной домашней работы по темам “Системы создания плазмы”, “Водород в металлах”**

1. Оценить минимальную мощность СВЧ-генератора с частотой 2,45 ГГц, требуемую для зажигания СВЧ-разряда в медном резонаторе при рабочем давлении 100 Па.
2. Оценить напряжение зажигания разряда в пенинговском разряде с расстоянием между катодами 2 см, диаметром анода 1 см, магнитным полем 0,05 Тл при давлении  $10^{-2}$  Па.
3. Оценить напряжение зажигания разряда в магнетронном разряде с диаметром катода 2 см, диаметром анода 3 см, длиной электродов 5 см, магнитным полем 0,05 Тл при давлении  $10^{-2}$  Па.
3. Ионный источник с накаливаемым катодом (геометрия Байарда-Альперта) имеет цилиндрическую сетку с длиной 2 см, диаметром 1 см, прозрачностью 99%. Напряжение на сетке 200 В. Оцените ток ионов с одного из торцов сетки при токе эмиссии катода 5 мА и рабочем давлении  $10^{-3}$  Па.
4. Ионный источник с накаливаемым катодом (геометрия Байарда-Альперта) имеет цилиндрическую сетку с длиной 2 см, диаметром 1 см. Напряжение на сетке 200 В. Оцените долю ионов  $H_3^+$ , вытекающих из источника при рабочем давлении водорода  $10^{-1}$  Па .
5. Излучение от СВЧ генератора (8 мм) проходит через волновод с давлением внутри волновода  $10^{-1}$  Па. Оцените, при какой мощности генератора в волноводе может произойти пробой.
6. Оценить величину напряжения на обходе тора, требуемую для зажигания разряда в токамаке T-10 при концентрации газа (водорода)  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>
7. Определить равновесную концентрацию водорода в меди при давлении водорода над поверхностью  $10^4$  Па.
8. Пучок водорода с плотностью тока 1 мА/см<sup>2</sup> и энергией 1 МэВ инжектируется в толстую танталовую мишень. Через какое время концентрация растворенного в тантале водорода сравняется с концентрацией металла?
9. Пучок водорода с плотностью тока 1 мА/см<sup>2</sup> инжектируется в медную мишень на глубину 10 мкм. Оценить максимальную концентрацию водорода в меди через 1000 с после начала облучения.

10. Определить максимальное количество водорода, которое может быть растворено в геттере St101 объемом  $0,1 \text{ см}^3$  при температуре 200 градусов

11. Найти равновесное распределение концентрации водорода в танталовой фольге толщиной 100 мкм при инжекции на одну из ее поверхностей пучка ионов водорода с плотностью тока  $1 \text{ мА/см}^2$  и энергией 1 МэВ. Поверхности считать свободными от загрязнений

### **Экзаменационные билеты по курсу “Техника плазменного эксперимента”**

#### **Билет 1**

1. Требования к вакуумным условиям термоядерных установок, общие характеристики вакуумных систем. Вакуумные системы плазменных установок – схемы построения, применяемые материалы, подготовка поверхности.
2. Оцените параметры элементов каскадного генератора для получения напряжения 30 кВ с мощностью 1 Вт при допустимом уровне пульсаций 1%?

#### **Билет 2**

1. Типы вакуумных насосов. Форвакуумные и высоковакуумные насосы
2. Рентгеновский ЭОП представляет собой микроканальную пластину, за которой установлен люминесцентный экран. Предложите схему питания ЭОПа для получения кадра с длительностью 200 нс.

#### **Билет 3**

1. Системы измерения вакуума, течеискатели
2. Оценить минимальную мощность СВЧ-генератора с частотой 2,45 ГГц, требуемую для зажигания СВЧ-разряда в медном резонаторе при рабочем давлении 100 Па.

#### **Билет 4**

1. Способы поддержания баланса вещества в плазме. Стационарные и импульсные системы газонапуска. Пеллет-инжекция
2. В применяемых в ИЯФ системах питания инжекторов нейтралов импульс высокого напряжения формируется с помощью искусственной линии и подается на нагрузку через повышающий трансформатор 1:20. Определите параметры и число элементов, составляющих длинную линию, для получения на выходе импульса 30 кВ, 60 А, 1 мс.

### Билет 5

1. Системы создания плазмы. Способы ионизации газа, виды газовых разрядов. Источники и генераторы плазмы. Плазменные пушки.
2. Турбомолекулярный насос со скоростью откачки 30 л/с подключен к вакуумному объему через гибкий шланг (сильфон) длиной 50 см. При каком диаметре сильфона он не ограничивает существенно скорость откачки?

### Билет 6

1. Магнитные системы плазменных установок. Типы магнитных катушек, разновидности соленоидов. Особенности магнитных катушек на сильные и сверхсильные магнитные поля. Материалы для магнитных систем. Сверхпроводящие магнитные системы. Измерение и контроль магнитного поля.
2. Определите энергию инъекции, необходимую для эффективного нагрева плазмы с помощью пучков быстрых атомов водорода в нейтронном генераторе на основе открытой ловушки ( $n=10^{14}$  см<sup>-3</sup>,  $l=30$  см). Какова эффективность конверсии протонного пучка в нейтралы при этой энергии?

### Билет 7

1. Емкостные накопители. Конденсаторы, их конструкции и основные характеристики. Большие конденсаторные батареи, их компоновка, ошиновка. Системы зарядки емкостных накопителей
2. Оценить требования к скорости откачки вакуумной печи объемом 20 л, в которой молибденовый лайнер нагревается до температуры 600 °С, при необходимости обеспечения рабочего вакуума не хуже  $10^{-2}$  Па

### Билет 8

1. Индуктивные накопители, их достоинства. Конструктивные особенности индуктивных накопителей. Размыкатели для индуктивных накопителей. Сверхпроводящие накопители.
2. Оценить расход гелия для криопанели площадью 1 м<sup>2</sup>, закрытой экраном, находящимся при температуре 77К.

### Билет 9

1. Системы коммутации напряжения, различные виды коммутаторов
2. Для проведения экспериментов Вам необходим пробкотрон с диаметром 10 см, расстоянием между пробками 30 см, магнитным полем в центре 1 Тл и пробочным отношением 2. Предложите геометрию магнитной системы пробкотрона, оцените требования к системе питания.

### Билет 10

1. Мегавольтные генераторы импульсных напряжений, формирующие и передающие линии, обостряющие системы.
2. Оцените поток газа (аргона и водорода), необходимый для работы перезарядной мишени тандемного ускорителя (БНЗТ).

### Билет 11

1. Средства нагрева плазмы. Инжекторы мощных пучков нейтралов.
2. Вакуумный объем с рабочим вакуумом  $10^{-4}$  Па откачивается с помощью турбомолекулярного насоса со скоростью откачки 500 л/с. Определите объем сорбционного насоса для обеспечения форвакуумной откачки в течение рабочего дня.

### Билет 12

1. Инерционные накопители. Ударные генераторы с маховиками. Униполярные генераторы.
2. Определите параметры конденсаторной батареи для питания пробкотрона, состоящего из двух катушек соленоида ГОЛ-3 ( $R_{\min}=75$  мм,  $R_{\max}=150$  мм,  $l=40$  мм, 69 витков), отстоящих друг от друга на 20 см, при необходимости получения магнитного поля в центре пробкотрона 2 Тл при длительности эксперимента 1 мс.

### Билет 13

1. Ключевые термоядерные программы: тороидальные системы, открытые ловушки, лазерный и пучковый УТС. Крупнейшие современные термоядерные установки, их краткая характеристика. Термоядерные установки будущего (ИТЕР и др.).
2. Оцените максимально возможную длительность импульса магнитного поля в соленоиде ГОЛ-3 при рабочем значении магнитного поля. Определите энергию, требуемую для питания соленоида и предложите возможную схему питания.



### **Билет 14**

1. Крионасосы. Разновидности, принципы работы, основные параметры
2. Предложите систему формирования импульса 20 кВ, 30 нс для питания ячейки Погкельса импульсного лазера.

## **7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### а) основная литература:

Сенченков А.П. Техника физического эксперимента. М. Энергоатомиздат, 1983.

Л.Голубчиков, ИТЭР. Решающий шаг

С.В. Мирнов, Энергия из воды

В.Д. Шафранов, К истории исследований по управляемому термоядерному синтезу УФН, т.177, н.8, с.877

Б.Кадомцев, В.Шафранов Магнитное удержание плазмы, УФН т.139, вып.3, с.399

Д.Рютов Открытые ловушки, УФН т.154, вып.4, с.565, 1986

В.П. Смирнов, Исследования по термоядерному синтезу, Вестник РАН, т.73, н.4, 2003

ITER Physics Basis, Nuclear Fusion 39 (1999), pages 2137-2638

ITER Plant Description Document (PDD)

Королев Б.И. Основы вакуумной техники. М.;Л.: Энергия: 1964.

Пипко А.И., Плисковский В.Я., Королев Б.И., Кузнецов В.И. Основы вакуумной техники. М.: Энергоатомиздат, 1981

Гельд П.В., Рябов Р.А. Водород в металлах и сплавах, М.: Металлургия, 1974

Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир,1972.

Диденко А.Н., Григорьев В.Л., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977.

Семашко Н.Н., Владимиров А.М., Кузнецов В.В., Кулыгии В.М., Панасенков А. А.

Инжекторы быстрых атомов водорода. М.: Энергоатомиздат,1981

### б. Дополнительная литература

J. Wesson Tokamaks

J.Wesson The Science of JET

C. Braams, M. Stott, Nuclear Fusion: half a century of magnetic confinement research, Plasma Physics and Controlled Fusion, V. 44, I. 8, pp. 1767 (2002).

Л.Спицер Стелларатор, УФН т.71, вып.2, с.327, 1960

Л.Коврижных Современный статус стеллараторной программы, УФН т.179, вып.9, с.772, 2009

Инженерные проблемы установок ТОКАМАК./ Под ред. В.А. Чуянова. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Глазков А.А., Саксаганский Г.Д. Вакуум электрофизических установок и комплексов. М.: Энергоатомиздат, 1985.

Саксаганский Г.Д. Вакуум Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988.

Пипко А.И., Плисковский В.Я., Королев Б.И., Кузнецов В.И. Основы вакуумной техники. М.: Энергоатомиздат, 1981,

Тренделенбург Э. Сверхвысокий вакуум. М.: Мир, 1966.

А,Т.Комов Вакуумные и криогенные системы термоядерных установок и реакторов, М. Издательство МЭИ, 2003

Димов Г.И. Быстродействующие затворы для импульсного напуска газа в вакуумные устройства. ПТЭ, №5, стр. 168, 1968

Алефельд Г., Фелькль И. Водород в металлах. Т1:,2

Гидриды металлов, под ред. В.Мюллера и др., М., Атомиздат, 1973

Монтгомери Д. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М.: Мир, 1971.

Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение. Под ред. Ф.Херлаха. М.: "Мир", 1988.

Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. М.: "Мир", 1985.

Фогельсон Т.Б., Бреусова Л.Н., Вагин Л.Н. Импульсные водородные тиратроны. М.: Сов. Радио, 1974.

Физика и техника мощных импульсных систем. Сб. статей под ред. Е.П. Велихова. М.: Энергоатомиздат, 1987.

Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. Л.: Энергия, 1973,

Импульсные системы большой мощности: сб. статей. Пер. с англ.; Под ред. Э.И. Асиновского. М.: Мир, 1981.

Слишков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Накопление и коммутация энергии большой плотности: сб. статей. Под. ред. У. Бостика, В. Нарди, О. Цукера. М.: Мир, 1979.

Техника больших импульсных токов и магнитных полей: сб. статей. Под ред. В.Г. Комелькова. М.: Атомиздат, 1970.

Воробьев Л.А. и др. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения. М.: Госэнергоиздат, 1960.

Комар Е. Г. Основы ускорительной техники. М.: Атомиздат, 1977.

Месяц Г.А., Насибов А.С., Кремнев В. В. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. М.: Энергия, 1970.

Месяц Г.А Импульсная энергетика и электроника, М., Наука, 2004

Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974.

Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для УТС и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Голант В.Е., Фёдоров В.Н. Высокочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц, М.: Мир, 1984.

Волин И.А. Импульсные помехи. М.: Радио, 1976.

Певчев Ю.Ф., Финогенов Х.Г. Автоматизация физического эксперимента, М.: Энергоатомиздат, 1986.

Доклады III Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, Т.14 (Ленинград, 1984г.) М.: ЦНИИАтоминформ, 1984.

Доклады IV Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, Т.14 (Ленинград, 1988 г.) М.: ЦНИИАтоминформ, 1988,

в) Программное обеспечение и интернет-ресурсы

Ltspice IV – программа для электротехнических расчетов

Femlab – пакет программ для расчетов электрических и магнитных полей

Matlab - программа для проведения численных расчетов

[www.nist.gov](http://www.nist.gov) – физические базы данных

<http://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/> - база данных элементарных процессов в плазме

<http://ufn.ru/> - сайт журнала “Успехи физических наук”

[http://adsabs.harvard.edu/abstract\\_service.html](http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html) - библиографическая база NASA

<http://ru.wikipedia.org>

**8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Персональный компьютер, проектор.