

УДК 62-1/-9

ОБЗОР ПО ЛИНЕЙНЫМ УСКОРИТЕЛЯМ

¹⁾ Туленберген Т.Р., ¹⁾ Соколов И.А., ¹⁾ Миниязов А.Ж., ¹⁾ Кайырды Г.К., ²⁾ Ситников А.А.¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан²⁾ Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, Барнаул, Россия

tulenbergenov@nnc.kz

Приведен обзор стационарных линейных симуляторов плазмы, используемых для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью применительно к термоядерным установкам и моделирования их пристеночной плазмы. Взаимодействие плазмы с поверхностью является важной проблемой создания защитных материалов для Международного Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР). К основным, обращенным к плазме компонентам, относятся первая стенка и дивертор. Основные функции дивертора заключаются в поглощении теплового потока, выходящего из пристеночной плазмы, и отводе гелия, который является продуктом сгорания в реакции термоядерного синтеза. Отдельно рассмотрены установки относительно небольших размеров с ограниченными возможностями и крупные линейные симуляторы мощностью в несколько десятков кВт с разнообразными средствами диагностики. На современных линейных симуляторах температура и плотность генерируемой плазмы близки к плазме SOL (scrap-off layer), тем самым актуально исследование процессов, непосредственно влияющих на материалы компонентов, такие как распыление атомов поверхности и изучение эрозии, внедрение в поверхность инородных частиц или напыление, модификация рельефа поверхности, блистерообразование.

Ключевые слова: линейные ускорители, плазма, термоядерные реакторы, взаимодействие, материалы, параметры установок, дивертор, первая стенка, плазменно-пучковый разряд, мишень.

ВВЕДЕНИЕ

При взаимодействии термоядерной плазмы с материалом наиболее важной проблемой является накопление трития в материале. Другой проблемой является повреждение вольфрамовой структуры нейтронами из плазмы.

В существующих термоядерных реакторах (ТЯР) (Jet, ASDEX, TORE-SUPRA и др.) наблюдались эффекты накопления трития и образования покрытий в виде твердых и мягких углеводородных пленок. В связи с этим активно проводятся экспериментальные исследования по накоплению изотопов водорода в графите. Присутствие трития замечено в местах, не находящихся в прямом контакте с плазмой. Знание процессов транспортировки частиц, турбулентности и образования упорядоченных структур в пристеночной плазме может дать возможность контролировать накопление и перенос трития в реакторе. Так как полностью избавиться от трития не получится, разрабатываются методы чистки поверхности реакторных материалов с помощью газовых разрядов.

Очень важны эксперименты по изучению процессов, происходящих при «срыве плазмы», когда температура и плотность плазмы приводят к расплавлению, испарению и эрозии реакторных материалов.

Снижение температуры и плотности приграничной плазмы приводит к уменьшению потока энергии на стенку, что может существенно увеличить срок эксплуатации приемных мишеней дивертора.

Для исследования изменений физико-механических и морфологических свойств материалов в термоядерных реакторах при воздействии плазмы, были разработаны специальные линейные установки, по-

зволяющие осуществлять контролируемые процессы взаимодействия плазма – материал.

В настоящее время существует достаточно много установок, используемых для имитации периферийной плазмы токамаков. Однако на сегодняшний день общепризнанные и часто цитируемые результаты получены на трех-четырех установках. Это американская установка PISCES-A и PISCES-B [1–5], японская NAGDIS-II [6], немецкая PSI (PSI-1, PSI-2, JULE-PSI) [7–10], российские установки ЛЕНТА Курчатовского института [11] и ПР-2 в НИЯУ МИФИ [12].

ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ PISCES

Одной из первых установок-симуляторов является Лабораторный исследовательский комплекс PISCES в Калифорнийском университете в Сан-Диего. В комплексе имеются несколько вариантов симуляторов: PISCES-A, который может непрерывно работать при потоках частиц и тепла, ожидаемых в современных устройствах термоядерного синтеза и PISCES-B с дистанционным управлением, помещенный в специальное помещение для работ с бериллием [1, 2].

Исследования, проводимые на симуляторах PISCES, направлены на изучение:

- влияния ELM (Edge Localized Modes) на дивертор и первую стенку;
- эффекта накопления трития в смешанных материалах и различных методов его удаления;
- процессов переноса плазмы к мишеням дивертора и стенкам токамака.

Схема линейного плазменного симулятора PISCES-A показана на рисунке 1.

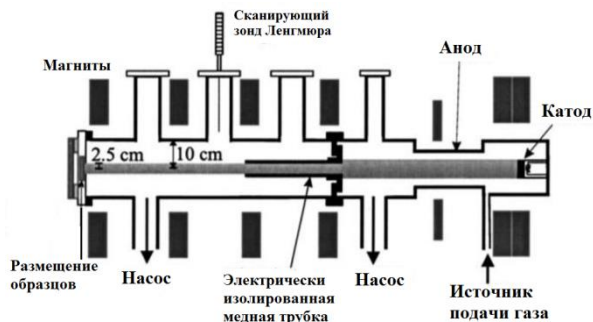


Рисунок 1. Схема линейного плазменного симулятора PISCES-A [2]

Устройство состоит из цилиндрической вакуумной камеры длиной 2,5 м и диаметром 0,2 м, которая дифференциально откачивается диффузионными насосами с холодным захватом для контроля давления газа в осевом направлении вдоль системы. Общая скорость откачки для водорода составляет около 4000 л/с и типичные базовые давления достигаются до 10^{-6} Торр. Вакуумная камера охлаждается медными водяными трубками, припаянными к стенкам. Большие смотровые окна обеспечивают визуальную диагностику процесса и гибкость в настройке специальных геометрических схем для экспериментов.

Плазма в PISCES-A создается рефлекторным дуговым разрядом от дискового катода из молибдена лантана (La-Mo) большой площади к охлаждаемому цилиндрическому аноду. Непрерывно работающий генератор водородной плазмы имеет длину около 0,5 м и создает плазму диаметром 0,09–0,1 м, ограниченную соленоидальным магнитным полем 0,2–0,4 Тл.

Плазма обычно имеет высокую плотность ($\geq 10^{19} \text{ м}^{-3}$) с температурой электронов 5–7 эВ. В одном режиме работы холодная плазма диффундирует вдоль магнитного поля к мишени, где ионы могут ускоряться на отрицательно смещенном потенциале образца. В данном режиме возможно получение очень высоких потоков тока на образец [1, 2]. Энергия ионов регулируется в диапазоне 50–500 эВ. На сегодняшний день установка PISCES-A генерирует поток плазмы в магнитном режиме с типичной электронной плотностью $\sim 10^{18}$ – 10^{19} м^{-3} и температурой электронов ~ 4 – 12 эВ в районе мишени, которые измеряются возвратно-поступательным зондом Ленгмюра [3].

Модернизированным вариантом симуляторов типа PISCES является установка PISCES-B, представленная на рисунке 2. Основное направление исследований является влияние примесей бериллия в дейтериевой плазме на эрозию плазменно-обращенных материалов [1, 4, 5].

Установка состоит из отсека с источником плазмы и основной камеры с мишенью, к которой подсоединено загрузочное устройство со специальной камерой загрузки. Максимальная тепловая нагрузка на мишень составляет 9 МВт/м².

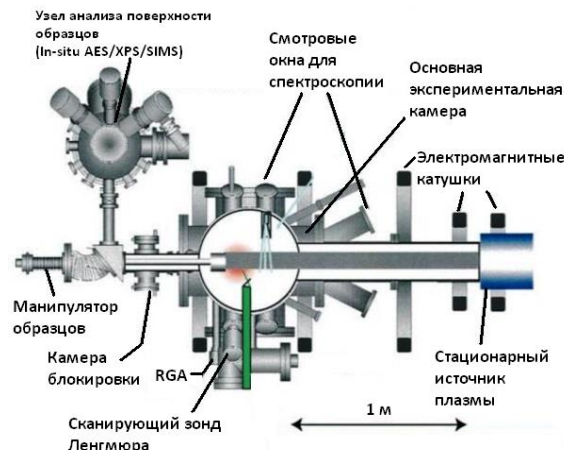


Рисунок 2. Вид сверху компоновки установки PISCES-B с источником Be пучка [4]

Генератором плазмы является отражательный дуговой разряд с горячим катодом из гексаборида лантана (LaB_6), нагреваемый до термоэмиссии вольфрамовыми подогревателями (стандартная схема, используемая и на других установках PSI и NAGDIS). Плазменный поток, формируемый продольным магнитным полем от 3 коротких катушек напряженностью 0,04 Тл имеет диаметр 0,06 м, что при достигаемой плотности плазмы $\sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$ требует достаточно большой скорости откачки. Для этого используются два турбомолекулярных насоса общей производительностью 6500 л/с. При этом остаточное давление составляет $7,5 \cdot 10^{-8}$ Торр.

Концентрация плазмы составляет от 10^{17} м^{-3} до 10^{19} м^{-3} в районе мишени, температура – 5–35 эВ, регулируются напуском газа и вариацией параметров разряда. Мишень охлаждаемая, что позволяет при изменении мощности на мишень поддерживать заданную температуру. Энергия попадающих на мишень ионов регулируется изменением подаваемого на мишень отрицательного потенциала.

Диагностическое оборудование установки включает в себя:

- быстрый сканирующий двойной ленгмюровский зонд для определения радиального распределения плотности и температуры плазмы;
- встраиваемый омега-метр масс-спектрометр для определения состава плазмы (в некоторых экспериментах);
- термопары, прикрепленные сзади мишени, для измерения температуры мишени, пирометр для измерения температуры лицевой стороны;
- газовый масс-спектрометр для повышенных давлений (MPA-565C Ferran Scientific) позволяет измерять состав газовой компоненты до и во время эксперимента (т.е. при давлении до 10^{-2} Торр);
- для измерения распыления образцов, как правило, используются две методики: по потере веса до и после облучения; с помощью оптического спектрометра с абсолютной градуировкой, позволяющего

контролировать излучение возбужденных в плазме распыленных атомов.

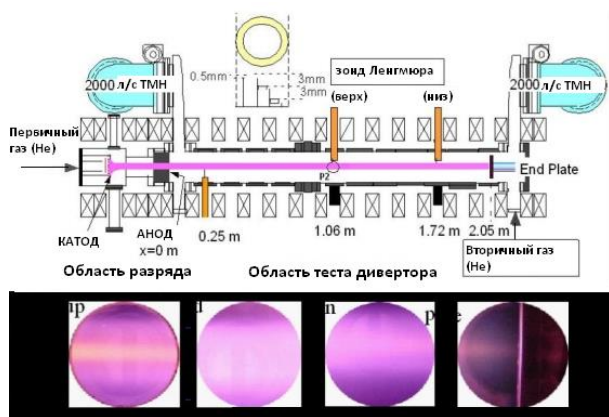
Особенностью этой установки является наличие специальной камеры для анализа состава поверхности образцов, не вынимая их из установки (in situ). К таким диагностикам относятся:

- комбинированная Оже-электронная и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (AES/XPS);
- термодесорбционный анализ (ТДС).

Установки типа PISCES и используемые на них методики исследований постоянно совершенствуются.

ЛИНЕЙНЫЙ СИМУЛЯТОР NAGDIS-II

Линейный симулятор диверторной плазмы NAGDIS-II, построенный в 1997 г. в Ногайском университете Японии для исследования физики краевой плазмы и поведения в ней различных материалов, представлен на рисунке 3.



б) внешний вид установки



а) схема установки

Рисунок 3. Линейный симулятор диверторной плазмы NAGDIS-II в Ногайском университете [6]

На рисунке 3 показаны схематический (а) и внешний (б) вид установки NAGDIS-II. Основным узлом установки является цилиндрическая вакуумная камера с водяным охлаждением длиной 2,5 м и диаметром 0,18 м. Магнитная система представляет собой соленоидальные магнитные катушки в количестве 21 штук. Напряженность магнитного поля составляет до 0,25 Тл. Это устройство может генерировать плазму

высокой плотности до 10^{20} м^{-3} для He и 10^{19} м^{-3} для H и температурой 5 эВ в стационарном состоянии, что соответствует условиям краевой плазмы в современных экспериментальных устройствах термоядерного синтеза.

На рисунке 4 показан источник плазмы установки NAGDIS-II, состоящий из дискового катода из гексаборида лантана (LaB_6) диаметром 108 мм, промежуточного полого электрода и полого анода из меди.

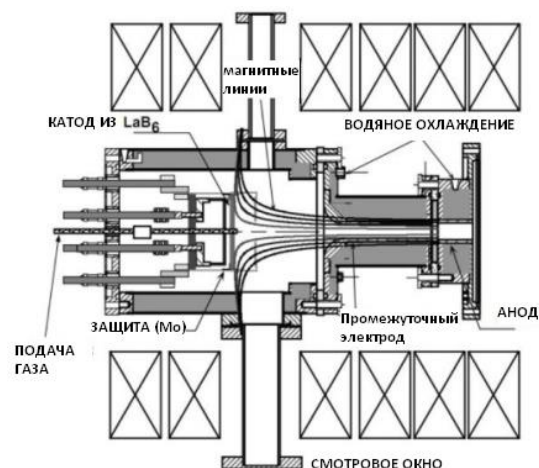


Рисунок 4. Сборка источника плазмы в NAGDIS-II [6]

Дисковый катод из LaB_6 нагревается графитовым нагревателем с типичной мощностью нагрева 3 кВт. Внешний нагрев катода облегчает запуск разряда и поддерживает напряжение разряда менее 100 В для гелиевой плазмы и 200 В для водородной плазмы во избежание дугового пробоя. Для повышения эффективности использования газа и отвода тепла от углеродного нагревателя перед катодом располагается молибденовый цилиндр. Сужение линий магнитного поля, показанное на рисунке 4, используется для обеспечения удержания плазмы. Диаметр полого анода на 24 мм больше диаметра промежуточного электрода (20 мм), поэтому магнитное поле, начинающееся с поверхности катода, не касается непосредственно поверхности анода. Эта магнитная конфигурация приводит к увеличению длины отклонения направления электронов, испускаемых с поверхности катода, что приводит к эффективным условиям разряда постоянного тока. Промежуточный электрод находится под плавающим потенциалом, что может минимизировать радиальные потери генерируемой плазмы, протекающей через промежуточный электрод. Вакуумная система представляет собой два турбомолекулярных насоса со скоростью откачки 2000 л/с и поддерживает давление в области разряда несколько сотен 10^{-3} Торр.

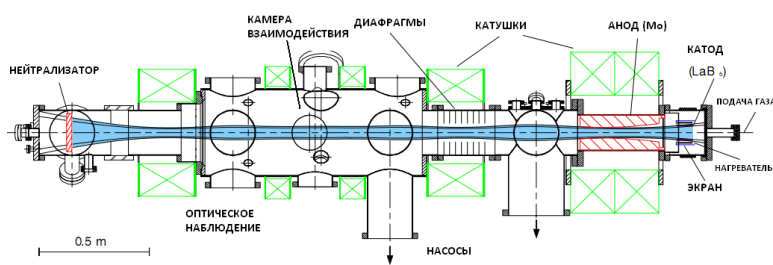
Плотность плазмы можно контролировать, изменяя ток разряда, поскольку эти величины пропорциональны. Плазменный шнур направляется на мишень с водяным охлаждением, установленный в конце вакуумной камеры.

ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА PSI

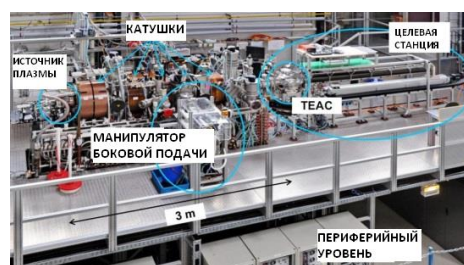
Наиболее совершенная установка типа линейного симулятора, которая является основной для стран Европейского сообщества, участвующих в программе ИТЭР, находится в Берлине под названием PSI-1 (Plasma Surface Interactions). Установка была запущена в 1992 году. После объединения Германии лаборатория, в которой была создана эта установка, стала отделением института физики плазмы (IPP) общества Макса Планка в Гархинге. В 1998 году после модернизации она получила название PSI-2.

Плазменная камера установки PSI окружена шестью катушками магнитного поля и включает в себя источник плазмы, буферную вакуумную область и камеру взаимодействия с мишенью. Плазма создается дуговым разрядом между нагретым катодом из LaB₆, на который подается отрицательное напряжение, и полым анодом из молибдена под потенциалом земли. В стандартной конфигурации магнитное поле в источнике увеличивается от 0,08 Тл на краю катода до локального максимума до 0,18 Тл в центре анода. В качестве рабочего газа чаще всего используются H₂, D₂, а также благородные газы и их смеси. Внешний край цилиндрического катода соединен с внутренней поверхностью анода вдоль линий магнитного поля, создаваемых первыми двумя катушками. В этой области дуговой разряд «горит» параллельно линиям магнитного поля, в отличие от центральной части, где разряд происходит поперек В-поля. Стационарный плазменный шнур имеет длину около 2,5 м и диаметр 5–10 см, который попадает на графитовую пластину нейтрализатора [7]. Схема и внешний вид установки представлены на рисунке 5.

В части плазменного шнура в установке PSI-2 однородное магнитное поле создано с помощью двух магнитных катушек, которые были добавлены к конфигурации катушек установки PSI-1. Плазма в камере-мишени контролируется несколькими стандартными средствами диагностики (лучевая диагностика, быстрый зонд Ленгмюра, томсоновское рассеяние). Достижимая плотность электронов и температура плазмы зависят от условий разряда (ток разряда/входная мощность и скорость нейтрального потока/давления) и рабочего газа и находятся в диапазонах 10^{11} – 10^{14} см⁻³, 1–20 эВ [8]. Давление может изменяться в пределах 10^{-2} –1 Па.



а) схема установки



б) внешний вид установки

Рисунок 5. Линейный симулятор плазмы PSI-2 [7, 9]

PSI-2 является испытательным стендом проекта [9, 10]. Основной задачей PSI-2 в Юлихе в связи с проектом JULE-PSI является разработка транспортной системы для образцов, которая позволяет позиционировать мишень на трех сегментах внутри камеры экспонирования, не нарушая основной вакуум и не прерывая разряд [10]. Сам проект JULE-PSI предусматривает линейную плазменную установку в ядерной среде для работы с материалами, облученными нейтронами и токсичными материалами. Основными научными задачами [11] линейного плазменного устройства проекта JULE-PSI и станции комплексного анализа поверхности являются исследования:

- эрозии радиационно-поврежденных плазменно-обращенных компонентов, влияние на морфологию поверхности/микроструктуру;
- удержания топлива в радиационно-поврежденных плазменно-обращенных компонентах;
- взаимодействия плазменной поверхности с Be;
- смешанных систем (Be – W – C), повторной эрозии осажденных частиц;
- удержания топлива в соединениях W – Be;
- влияния температуры поверхности на взаимодействия плазмы с поверхностью;
- сочетания высоких тепловых нагрузок и воздействия плазмы, синергетический эффект;
- образцов Be/T (JET, ITER): характеристика поверхности и определение общего количества топлива;
- удаления топлива с использованием токсичных реактивных газов.

Для достижения этих целей JULE-PSI является стационарным линейным плазменным генератором на основе сильноточного дугового разряда при низком давлении, который позволяет получить флюенс частиц и энергию ионов, соответствующих планируемому в реакторе ИТЭР.

ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫЕ УСТАНОВКИ

Как уже было отмечено ранее, в России имеется две подобные установки для имитационных исследований. Прежде всего, это ЛЕНТА в Курчатовском институте и ПР-2 в НИЯУ МИФИ. Эти установки объединяет то, что они созданы как плазменно-пучковые машины, плазма в которых генерируется мощным электронным пучком в магнитном поле.

ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫЕ УСТАНОВКИ

Как уже было отмечено ранее, в России имеется две подобные установки для имитационных исследований. Прежде всего, это ЛЕНТА в Курчатовском институте и ПР-2 в НИЯУ МИФИ. Эти установки объединяет то, что они созданы как плазменно-пучковые машины, плазма в которых генерируется мощным электронным пучком в магнитном поле.

Установка ЛЕНТА, расположенная в Институте ядерного синтеза Российского научного центра «Курчатовский институт», была построена в 1991 году. ЛЕНТА имеет линейную конфигурацию и предназначена для исследования взаимодействия плазмы с газовыми и твердотельными мишенями, а также для технологической плазменной обработки материалов. Установка действует в стационарном режиме. Схема пучково-плазменной установки ЛЕНТА с аксиальным магнитным полем представлена на рисунке 6.

Полная длина установки – 4,5 м, диаметр цилиндрической разрядной камеры – 0,016 м. Плазма генерируется в постоянном магнитном поле 0,1–0,2 Тл с помощью пучково-плазменного разряд (ППР), который осуществляется при взаимодействии электронного пучка с рабочим газом в разрядной зоне. В качестве рабочего газа могут выступать Ar, He, Ne, D₂, N₂, а также с воздух. Источник электронов расположен на оси камеры в одном из её концов и представляет собой прогреваемый термоэмиссионный вольфрамовый цилиндрический катод диаметром 0,02 м и молибденовый водоохлаждаемый анод. Ускоряющее напряжение – 1–6 кВ, электронный ток – 0,1–3 А.

Разрядная камера установки отделяется от электронного инжектора диэлектрическими стенками, что позволяет обеспечить необходимые условия для его работы. Плазменный поток, сгенерированный в разрядной зоне, свободно вытекает вдоль силовых линий магнитного поля в зону взаимодействия длиной 1 м, в которой, в зависимости от условий эксперимента, либо установлены образцы исследуемых материалов, либо образована газовая мишень путем подачи вторичного газа.

Откачка установки до высокого вакуума осуществляется шестью турбомолекулярными насосами сум-

марной мощностью 6000 л/с. Давление по длине установки изменяется и составляет 10^{-1} – 10^{-3} Торр в газовой мишени, 10^{-3} – 10^{-4} Торр – в разрядной зоне и доходит до 10^{-5} – 10^{-6} Торр в отсеке электронного инжектора.

На установке возможны два режима плазменно-пучкового разряда: в скрещенных магнитном и электрическом полях, когда в дополнение к магнитному полю применяется радиально направленное электрическое поле, и в прямом магнитном поле. Параметры плазмы и радиальная структура плазменного столба зависят от выбранного вида разряда.

При первом режиме образуется кольцевой плазменный поток, представленный на рисунке 7-а. Между центральным электродом и стенками камеры прикладывается разность потенциалов $\sim 50 \div 200$ В. Плазменный поток имеет диаметр $\sim 0,08$ м. Мощность, вкладываемая в плазму, достигает 15 кВт. Плотность плазмы составляет $5 \cdot 10^{17} \div 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, температура электронов в зоне взаимодействия $- 2 \div 30$ эВ.

При втором режиме образуется шнуровой плазменный поток, представленный на рисунке 7-б. Данный режим характеризуется меньшей энергией, вкладываемой в плазму – до 5 кВт. В зоне взаимодействия плотность плазмы составляет $5 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, а температура электронов значительно ниже, чем в режиме с кольцевым плазменным потоком – 0,5÷8 эВ. Плазменный поток имеет диаметр до 0,06 м. Возможность генерации достаточно плотной и холодной плазмы в этом режиме делают его наиболее подходящим для моделирования процессов, происходящих в газовом диверторе реактора-токамака.

Установка ПР-2 представляет собой открытую адиабатическую ловушку с пробочным отношением 1,55, была построена в начале 60-х годов в ИАЭ им. И.В. Курчатова. Общая схема установки приведена на рисунке 8. Ее основой является вакуумная камера цилиндрической формы длиной 2,5 м и диаметром 0,36 м с системой охлаждения, выполненная из нержавеющей стали. Высоковакуумная откачка производится двумя диффузионными насосами производительностью 1200 л/с каждый, работающими на кремнийорганическом эфире.

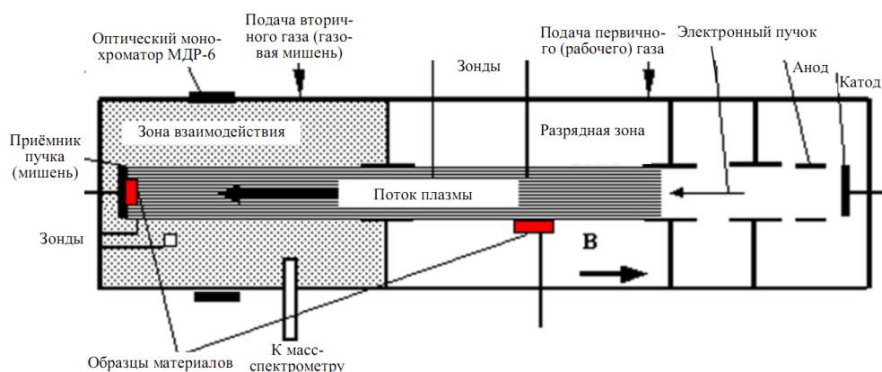
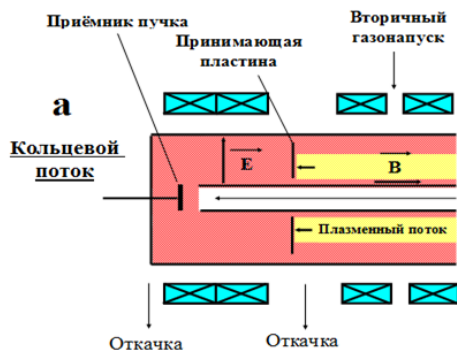
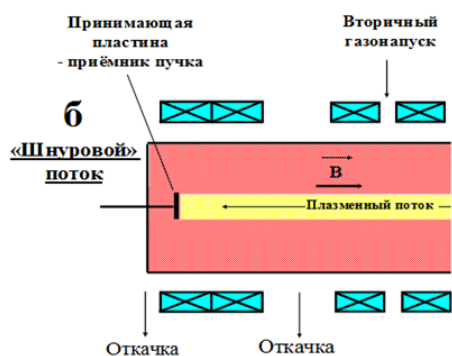


Рисунок 6. Схема плазменной установки ЛЕНТА [12]

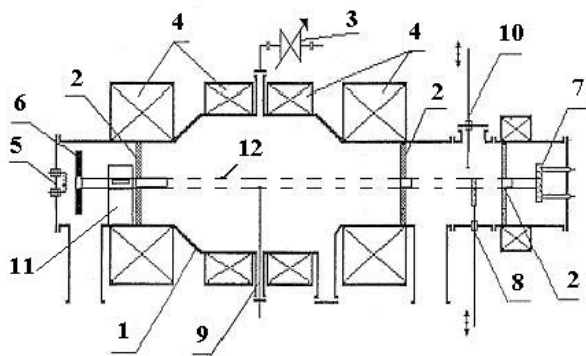


а) режим горения ППР в скрещенных магнитном и электрическом полях



б) режим горения ППР в прямом магнитном поле

Рисунок 7. Режимы горения ППР и образования плазмы [13]



1 – вакуумная камера; 2 – диафрагмы; 3 – система напуска газа; 4 – катушки магнитного поля; 5 – катод; 6 – анод; 7 – коллекторное устройство; 8 – шлюзовое устройство №1; 9 – ленточный зонд; 10 – шлюзовое устройство №2; 11 – встраиваемый масс-анализатор компонентного состава с π -поворотом в поле установки; 12 – плазменный шнур

Рисунок 8. Схема установки ПР-2 [13]

Насосы снабжены ловушками, охлаждаемыми жидким азотом. Набор диафрагм дифференциальной откачки дает возможность разбивать камеру на секции и с помощью системы игольчатых натекаелей создавать неоднородное по оси распределение рабочих газов. Сменные торцевые и боковые фланцы позволяют вводить электроды и устройства диагностики, подавать рабочие газы в камеру, а также воду или

жидкий азот в охлаждаемые узлы. Через кварцевые окна и систему зеркал возможно визуальное наблюдение, фотографирование и спектрометрирование процессов в рабочем объеме. Установка оснащена шлюзовым устройством со штоком, позволяющим осуществлять поступательно-вращательное движение для оперативной смены и перемещения средств диагностики или облучаемых образцов без разгерметизации установки.

Основой магнитной системы установки являются две пары катушек с водяным охлаждением, электропитание которых может осуществляться как от машинных генераторов постоянного тока мощностью до 100 кВт каждый, так и от трехфазных силовых трансформаторов с водо-охлаждаемыми выпрямительными блоками. Для изменения осевого распределения магнитного поля в торцевых частях установки, а также осуществления бокового смещения магнитной оси используются дополнительные корректирующие катушки. Таким образом, электромагнитная система установки позволяет в широких пределах варьировать величину магнитного поля (до 0,5 Тл) и его конфигурацию (типа пробкотрон и антипробкотрон, однородное или магнитное сопло).

Мощная пушка, вмонтированная на торцевом фланце, создает осевой электронный пучок. Керамический изолятор позволяет поднимать катодное напряжение до 50 кВ. Пушка имеет легкодоступный катодный блок. Вольфрамовые и танталовые катоды прямого накала формируют электронный пучок кольцевой или ленточной формы. При работе с пучком цилиндрической формы используют косвенный подогрев катодных таблеток, выполненных из LaB_6 , W, Mo или Ta (диаметр 0,08–0,3 м). Конструкция электронной пушки допускает применение катодной маски при использовании многоапертурной оптики и дополнительного электрода для управления пучком и защиты от ионного потока из разрядной области. Все узлы пушки имеют водяное охлаждение, что обеспечивает ее работоспособность, как в высоковольтном вакуумном режиме, так и в режиме дуги низкого давления. Электрическая схема имеет защиту по току от пробоев и замыканий, в процессе работы позволяет регулировать и измерять токи и напряжения всех электродов и системы накала, а также дистанционно переключать блоки питания при переходах между высоковольтным вакуумным и силовым дуговым режимами. Предельные параметры блоков составляют соответственно 25 кВ, 3 А и 450 В, 50 А. С помощью набора дополнительных блоков питания можно подавать электрические смещения на коллектор и электроды в разрядном объеме, например, для реализации режимов холловского ускорения или полого катода, пеннинговского или пучково-магнетронного разрядов. Основные параметры плазмы в установке ПР-2 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры плазмы в установке ПР-2

Режим работы	стационарный
Рабочий газ	He, Ar, H ₂
Магнитное поле, Тл	до 0,5
Давление рабочего газа, Торр	$7,5 \cdot 10^{-6}$ – $7,5 \cdot 10^{-3}$
Давление остаточного газа, Торр	$7,5 \cdot 10^{-7}$
Мощность инжектируемого электронного пучка, кВт	до 15
Плотность генерируемой плазмы, м ⁻³	до 10^{19}
Электронная температура, эВ	5–25
Отрицательное смещение на катоде относительно заземленного анода, кВ	0–5
Ток накала, А	до 15

Данная установка предоставляет возможность изучать взаимодействие водорода с конструкционными материалами термоядерного реактора приближенных к реальным условиям (интенсивные потоки водородной плазмы на образец, возможность варьировать тепловую нагрузку на образец в широком диапазоне). Ниже представлены в виде таблиц сводные параметры основных линейных симуляторов: их технические характеристики в таблице 2; тематика проводимых исследований в таблице 3 и основные средства диагностики в таблице 4, а также особенности этих установок в таблице 5.

Таблица 2. Технические характеристики установок

	NAGDIS-II	PISCES-A	PISCES-B	PSI-2	ЛЕНТА	ПР-2
Габариты установки (длина × ширина, м)	4×2	3×1,5	4×2	4×2	5×2	4×2
Размер разрядной камеры (длина, м × диаметр, см)	2,5×19	1,2×20	1,2×30	1,5×30	4,5×60	2,5–4×36
Размер пучка (длина, м. × диаметр, см.)	1,8×2	1×2	1×3	1×18	2×16	2,5×8–30
Магнитное поле, Тл	0,25	0,5–2,3	0,2–0,5	0,1–0,2	0,2	0,5
Способ получения плазмы	дуговой разряд				ППР	
Минимальное давление в рабочей камере, мТорр	0,01	0,01	0,01	0,0001	0,01	0,01
Предельная температура электронов, эВ	20	20	40	25	30	25
Плотность электронов плазмы, 10^{19} м ⁻³	6	1	5	2	1	1
Предельная температура ионов, % Те	60	20	40	40	40	40
Количество методов диагностики плазмы (одновременно)	5	4	8	6	4	4

Таблица 3. Основные исследования, приводящиеся на установках

	NAGDIS-2	PISCES-A	PISCES-B	PSI-2	ЛЕНТА	ПР-2
Эрозия поверхности	+	+	+	+	+	+
Блистерообразование	+	–	+	–	–	–
Накопление изотопов водорода в материалах и рост углевод. пленок	+	+	–	+	–	–
Отрыв плазмы	+	–	+	+	+	–
Транспорт частиц в плазме	+	+	+	+	+	+
Турбулентность	+	–	+	+	+	+
Образование упорядоченных структур	–	+	+	+	–	+
Испытание материалов для дивертора ИТЕР	+	–	+	+	+	–
Изучение газовых разрядов и возможностей их применения в промышленности	–	–	–	+	–	+

Таблица 4. Основные средства диагностики, применяемые в симуляторах

	NAGDIS-2	PISCES-A	PISCES-B	PSI-2	ЛЕНТА	ПР-2
Сканирующий зонд Ленгмюра	+	+	+	+	+	–
Зонд Ленгмюра	+	+	+	+	+	+
Двойной зонд Ленгмюра	+	+	+	+	+	+
Зонд Маха	–	–	–	+	–	–
Оптическая спектроскопия	+	+	+	+	+	+
Интерферометрия	–	–	–	+	–	+
Масс-спектрометр	–	–	–	–	–	+
Квадрупольный масс-спектрометр	–	–	–	+	–	+
ОЖЕ, ВИМС, рентгеновская спектроскопия	–	–	+	–	–	–

Таблица 5. Особенности установок

	NAGDIS-2	PISCES-A	PISCES-B	PSI-2	ЛЕНТА	ПР-2
Рабочее вещество	H, D, He, инертные газы	H, He, инертные газы	H, D, He, инертные газы	H, D, He, инертные газы	H, D, He, инертные газы	H, D, He, инертные газы, пары металлов
Исследование поверхности образца сразу после облучения	–	–	+	–	–	–
Прочие особенности	ионно-циклотронный резонансный нагрев для увеличения температуры ионов	нет	возможность работы с токсичными металлами и соединениями	нет	нет	ленточный катод – прецизионная регулировка размера и формы пучка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ опубликованной литературы по линейным симуляторам показывает актуальные технические характеристики, функциональные

возможности, а также направления исследований в области взаимодействия плазмы с материалами компонентов термоядерных реакторов.

ЛИТЕРАТУРА

- Goebel, D. M., Campbell, G., Conn, R. W. Plasma surface interaction experimental facility (PISCES) for materials and edge physics studies. – Journal of Nuclear Materials, 1984, vol. 121, p. 277–282.
- Antar G. Y. On the origin of “intermittency” in the scrape-off layer of linear magnetic confinement devices. – Physics of plasmas, 2003, vol. 10, № 9, p. 3629–3634.
- Hudson B. F., Doerner R.P. Impurity transport measurements in the PISCES-A linear plasma device. – 2011.
- Doerner R.P., Baldwin M.J. Schmid K. The influence of beryllium containing plasma on the evolution of a mixed-material surface. – Physica Scripta, 2004, vol. T111, p. 75–79.
- Doerner R.P. Measuring the difference between gross and net erosion. – Nuclear Fusion, 2012, vol. 51, 7 pp.
- N. Ohno, D. Nishijima, S. Takamura et al. Static and dynamic behaviour of plasma detachment in the divertor simulator experiment NAGDIS-II. – Nuclear Fusion, 2001, vol. 41, p. 1055–1065.
- Kastelewicz H., Fussmann G. Plasma modeling for the PSI Linear plasma device. – Contrib. Plasma Physics, 2004, vol. 44, No 4, p. 352–360.
- Pospieszczyk A., et.al. Spectroscopic characterisation of the PSI-2 plasma in the ionising and recombining state. – Journal of Nuclear Materials, 2013, vol. 438, p. S1249–S1252.
- Kreter A. et.al. Status of technological development for the JULE-PSI project. – 4th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF), 2013.
- Kreter A., et.al. Linear plasma device PSI-2 for PMI studies. – Fusion science and technology, 2015, vol. 68, p. 8–14.
- B. Unterberg et al. New linear plasma devices in the trilateral euregio cluster for an integrated approach to plasma surface interactions in fusion reactors. – Fusion Engineering and Design, 2011, vol. 86, p. 1797–1800.
- Мартыненко Ю.В., Хрипунов Б.И., Петров В.Б. Изменение поверхности вольфрама и графита под воздействием больших потоков плазмы. – ВАНТ Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. № 4, с. 14–23.
- Визгалов И.В., Курнаев В.А., Тельковский В.Г., и др. Лабораторный практикум по курсу «Физика горячей плазмы и УТС». Под редакцией Тельковского В.Г. Москва. МИФИ, 1995.

СЫЗЫҚТЫ ҮДЕТКІШ БОЙЫНША ШОЛУ

¹⁾ Т.Р. Туленберген, ¹⁾ И.А. Соколов, ¹⁾ А.Ж. Миниязов, ¹⁾ Г.К. Кайырды, ²⁾ А.А. Ситников

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²⁾ И.И. Ползунов атындағы Алтай мемлекеттік техникалық университеті, Барнаул, Россия

Термоядролық қондырғыларға сәйкес беті бар плазманың өзара әрекеттесуін зерттеу және оларды қабырғалық плазмаға модельдеу үшін пайдаланылатын плазманың стационарлық жүйелік симуляторларға шолу жүргізілді. Плазманың бетімен өзара әрекеттесуі Халықаралық Термоядролық Эксперименттік Реакторы (ITER) үшін қорғау материалдарын құрудың маңызды мәселесі болады. Плазмаға айналдырған компоненттердің негізіне бірінші қабырға және дивертор жатады. Дивертордың негізгі функциясы термоядролық синтез реакциясында жану өнімі болатын гелийді айыру және қабырғалық плазмадан шығатын жылу ағымын сіңіру болады. Қуаты диагностиканың түрлі құралдарымен бірнеше ондаған кВт ірі жүйелік симуляторлар және шектеулі мүмкіндіктері бар бірнеше өлшемдеріне қатысты қондырғылары жеке қарастырылды. Қазіргі желілік симуляторларда тудырылған плазманың температурасы және тығыздығы SOL (scrap-off layer) плазмаға жақын, сонымен қатар бетінің атомдарын тозаңдату және эрозиясын зерттеу, бөтен бөлшектердің бетін енгізу немесе шаңдату, үстінгі рельефті түрлендіру, блистер пайда болу ретінде компоненттердің материалдарына әсер ететін тікелей процесстерін белсенді зерттеу.

Кілт сөздер: сызықты үдеткіштер, плазма, термоядролық реакторлар, өзара әрекеттесуі, материалдар, қондырғылар параметрлары, дивертор, бірінші қабырға, плазмалық- шоқ разряд, нысана.

THE LINEAR ACCELERATORS REVIEW

¹⁾ T.R. Tulenbergenov, ¹⁾ I.A. Sokolov, ¹⁾ A.Zh. Miniyazov, ¹⁾ G.K. Kayyrdy, ²⁾ A.A. Sitnikov

¹⁾ Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The stationary linear plasma simulators was reviewed, which are used to study the interaction between plasma and surface with regard to fusion facilities and modeling of their edge plasma. The interaction between plasma and surface is an important issue in creation of protective materials for the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). The first wall and divertor are the key plasma faced components. The basic functions of the divertor are a heat flux absorption released from the edge plasma and helium removal, which is a combustion product in the thermonuclear synthesis reaction. Relatively small facilities with limited capacities as well as large linear simulators with a capacity of several dozen of kW and various diagnostic tools have been considered separately. Since the modern linear installations have a temperature and density of the generated plasma close to SOL plasma (scrap-off layer), it is possible to research the processes which directly affect materials of the components. This is a modification of surface during plasma irradiation or with charged particle beams. This includes atomization of a surface and studying of erosion, penetration of foreign particles into the surface or coating, surface relief modification, blister generation.

Keywords: linear accelerators, plasma, fusion reactors, interaction, materials, setup parameters, divertor, first wall, plasma- beam discharge, target.