

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный
университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)**

Физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени магистра**

Кафедра _____ физики плазмы _____

(название кафедры)

_____ Медведева Анна Александровна _____

(фамилия, имя, отчество студента)

Название работы:

_____ Стойкость материалов плазмоприемников _____
_____ для термоядерных установок нового поколения _____

Научный руководитель:

_____ канд. физ.-мат. наук Шошин Андрей Алексеевич _____
(звание, фамилия, имя, отчество, роспись)

Новосибирск – 2013 год

Содержание

Содержание	2
Введение	3
1. Обзор установок для изучения стойкости материалов плазмоприемников	4
2. Эксперименты на ГОЛ-3	9
2.1. Установка ГОЛ-3 и позиционирование мишеней	9
2.2. Измерение потока	11
2.3. Результаты исследования поверхности	14
2.4. Ленгмюровский зонд как одна из диагностик	19
3. ГДМЛ	26
3.1. ГДМЛ	26
3.2. ГДМЛ–Т для испытания материалов	28
Заключение	35
Благодарности	36
Библиография	37

Введение

Термоядерные установки нового поколения призваны реализовать проект системы крупномасштабной промышленной энергетики, достигнув необходимых для его эффективного использования параметров. На сегодняшний день показано, что токамаки могут стать прототипом магнитного термоядерного реактора ДЕМО [1]. Получена плазма с термоядерными параметрами, накапливается опыт работы с некоторыми реакторными технологиями. Стойкость материалов плазмоприемников под воздействием значительных радиационных и тепловых нагрузок является главным критерием выбора конструкционных материалов термоядерных установок. Выбранные материалы должны служить длительное время под действием мощных потоков нейтронов и частиц плазмы, рентгеновского излучения. Для строящегося ИТЭРа плазмопринимающими материалами станут первая стенка из бериллия и дивертор из вольфрама и, возможно, углеродного композита.

В силу своей геометрии, открытые магнитные ловушки удобны для поиска наилучших конструкционных материалов. Так в ИЯФ планируется создание линейной ловушки нового поколения ГДМЛ, которая позволит облучать образцы в сильном магнитном поле в условиях мощного стационарного и импульсного облучения. Основным модулем ГДМЛ должен быть осесимметричный пробкотрон с плещущимися ионами, подобный центральной части газодинамической ловушки ГДЛ. Второй важнейший модуль – расширитель, где силовые линии магнитного поля выходят на материальную поверхность – плазмоприёмник. На плазмоприемнике открытой ловушки могут достигаться наиболее высокие параметры падающего потока, пока не доступные в других типах плазменных экспериментальных установок. Например, в ИЯФ СО РАН многопробочная ловушка ГОЛ-3 с высокотемпературной плазмой позволяет получить самую большую плотность плазменного потока на сегодняшний день.

В данной работе описаны эксперименты на установке ГОЛ-3 по взаимодействию потока плазмы с образцами из вольфрама, представлены результаты измерения параметров плазмы тройным зондом Ленгмюра и предложен план экспериментов на установке ГДМЛ-Т.

1. Обзор установок для изучения стойкости материалов плазмоприемников

Проблема выбора материалов первой стенки и дивертора термоядерного реактора имеет огромное значение, учитывая то, что на поверхность вакуумной камеры токамака падают интенсивные радиационные и тепловые потоки. Для них должен быть найден приемлемый набор механических, теплофизических, коррозионных и активационных свойств, которые и будут определять эксплуатационные характеристики реактора. Материал первой стенки термоядерного реактора должен удовлетворять следующим основным требованиям [2]:

- низкая эрозия при реакторных параметрах в плазменном шнурае;
- устойчивость к тепловым стационарным нагрузкам до 10 МВт на м²;
- минимальная активация при воздействии быстрых нейтронов и гамма-квантов;
- высокая теплопроводность и низкая ползучесть;
- малый захват и проницаемость для трития;
- хорошие технологические свойства.

Так для проекта ИТЭР [3] помимо стационарного потока горячей плазмы с плотностью энергии не больше 0,5 МДж/м² за время работы важную роль играет импульсное воздействие при срывах и неустойчивостях плазменной границы ЭЛМ (Edge Localised Mode) с нагрузкой до 10 МДж/м² за 1 мс [4]. В ИТЭРе дивертор будет покрыт вольфрамом и углеродными композитами, а вакуумная камера будет иметь бериллиевые стенки [5]. Исходя из опыта существующих плазменных установок, а также экспериментов, моделирующих взаимодействие плазмы со стенкой, известно, что в ИТЭРе взаимодействие мощных плазменных сгустков со стенками приведет к плавлению металлических поверхностей с разбрызгиванием расплавленных частиц, к образованию трещин с последующим разрушением материала и к образовыванию пыли и пленок с наноразмерными структурами.

Современные плазменные установки неспособны воспроизвести нагрузки, соответствующие срывам внутри реактора, но, исходя из моделирования [6] и экспериментов с меньшими потоками, ясно, что уровень разрушения материалов при таких нагрузках недопустим. Поэтому активно проводятся эксперименты по сглаживанию срывов с помощью напуска тяжелых газов [4]. При этом часть энергии

плазмы преобразуется в энергию излучения в видимой и близкой ультрафиолетовой области спектра. В результате такого преобразования поток энергии распределяется по большей площади, что позволяет снизить нагрузки на плазмоприемник, но одновременно с этим возникает необходимость исследовать влияние излучения в указанном диапазоне на материал первой стенки. Аналогично срывам для борьбы с ЭЛМ планируется инъекция газов и модификация магнитного поля в ИТЭР.

ЭЛМ и срывы исследуются на существующих токамаках ASDEX [6, 8], JT-60 [9], TEXTOR [9], JET [7,10], несмотря на относительно небольшие плотность падающей на стенку энергии и время удержания плазмы, которые на порядок меньше параметров ИТЭР. Для исследования взаимодействия плазмы реактора с материалами используются плазменные ускорители, которые могут приблизиться к уровню соответствующих срывам и ЭЛМ нагрузок. Например, в квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе КСПУ в ГНЦ РФ ТРИНИТИ изучается торможение потока аргоновой плазмы с плотностью энергии от 0,2 до 4 МДж/м² и длительностью до 0,5 мс на твердотельной мишени из вольфрама или С-композита [12]. В плазменной установке MAGNUM-PSI [13] достигается поток до 0,1 МДж/м². Для достижения необходимых значений плотности энергии используют установки с электронными пучками, такие как, например, JUDITH с мощностью до 15 ГВт/м² и длительностью от 1 мс до режима постоянного тока.

Отдельно развиваются установки, моделирующие взаимодействие с поверхностью плазмы дивертора ИТЕР. Например, диверторный симулятор NAGDIS [14] генерирует импульсы 20-500 мкс с мощностью в несколько кВт/м². В установке PSI-2 [15] создается плазменный столб длиной 2,5 метра с температурой 1-20 эВ и плотностью 10^{11} - 10^{13} см⁻³. Сходные параметры имеют установки DT-ALPHA, MAP-II, TPD-Sheet IV и PISCES-B.

Открытые магнитные ловушки удобны для решения важнейшей задачи термоядерной энергетики: поиска наилучших конструкционных материалов. Так в ИЯФ СО РАН планируется создание линейной ловушки нового поколения, которая позволит облучать длительное время образцы в сильном магнитном поле в условиях мощного стационарного и импульсного облучения, ГДМЛ. Основная цель проекта – разработка термоядерного реактора на основе открытой ловушки. Центральная часть линейной термоядерной ловушки представляет из себя осесимметричный пробкотрон с плещущимися ионами. Важнейшим с точки зрения испытания стойкости материалов является другой модуль – расширитель. Это та часть ловушки, где силовые линии

магнитного поля выходят на материальную поверхность – плазموприёмник, а поток плазмы вдоль магнитного поля останавливается, охлаждается и нейтрализуется.

Рассмотрим нагрузки на материалы плазмоприемников ИТЭР и ГДМЛ. В стационарном режиме ИТЭР на стенку падает поток тепла с плотностью мощности 5 МВт/м². На существующих токамаках были открыты колебания плазменной границы (ЭЛМ), без которых невозможен переход к моде с высоким уровнем удержания. Например, на токамаке KSTAR с параметрами, приведенными в таблице (Таблица 1), были замечены три типа ЭЛМ, которые отличаются амплитудой и частотой (Рисунок 1) [21]. Такие колебания приводят к резким процессам релаксации, которые могут вызвать разрушение материалов, контактирующих с плазмой, в реакторе типа ИТЭР. Ожидаемые нагрузки в таких случаях в 20 раз превышают допустимые. [22]

Таблица 1 Параметры токамака KSTAR

Большой радиус	1,8 м
Малый радиус	0,5 м
Тороидальное магнитное поле	3,5 Тл
Нагрев	14 МВт
L-N переход	$n_e \sim 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$
T_i	2-3 кэВ

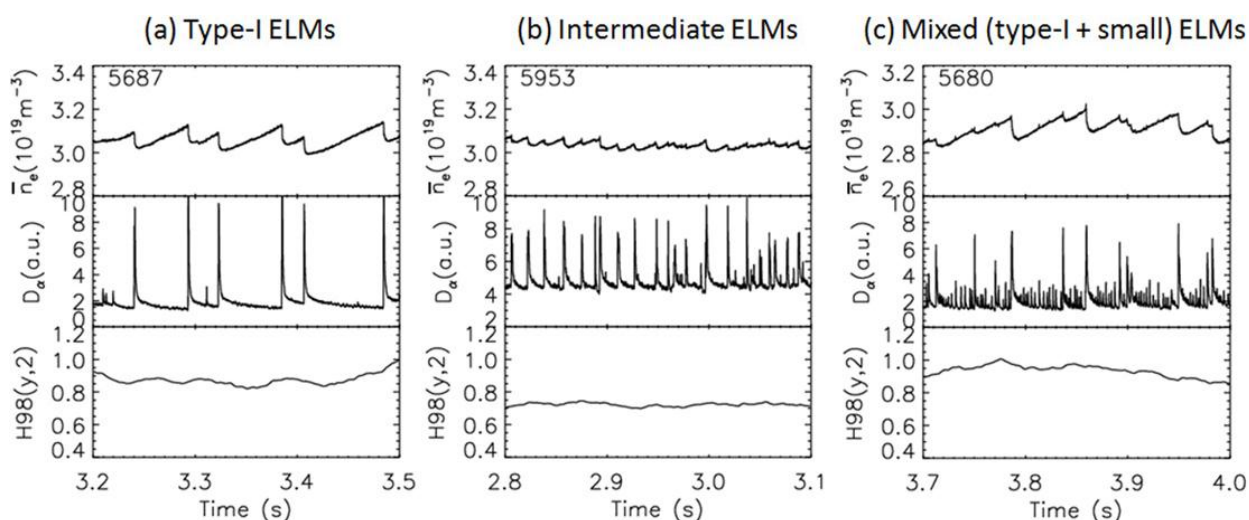


Рисунок 1 — Три типа ЭЛМ в токамаке KSTAR

Event	Energy density (incident on PFC) (MJ m^{-2})	Duration (ms)	Heat flux density (incident on PFC) (MW m^{-2})	No. of events	Max. Be temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Max. Be/Cu temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Max. Be melt layer thickness (mm)	Max. Be evap. thickness (mm)	Allowed no. of events at a given loc. based on melt + evap.	Allowed no. of events at a given loc. based on evap. only	Lifetime (lower estimate)	Lifetime (higher estimate)
Uncontrolled ELMs	2	0.375	10000	0	2724*	317*	0.22*	0.25*	17*	32*	Beyond the design basis	
Disruptions (DMS success)	1	3.	333	1350	1559	363	0.01	4.5×10^{-5}	796	1.77×10^5	8849	1.9×10^6
Disruptions (DMS success)	1	9.	111	1350	1276	363	0	2.5×10^{-6}	3.2×10^6	3.2×10^6	35×10^6	35×10^6
Disruptions (DMS failure)	10	3.	3333	150	3000	374	0.8	0.06	9	133	930	13333
Disruptions (DMS failure)	10	9.	1111	150	2398	370	0.7	0.07	10	114	1039	11429
VDE (DMS)												
1. Loss of control	2.2	300	40	135	2300*	379*	0.81*	0.038	9*	210*	1048*	23392*
2. Quench		1.5	1470									
VDE (no DMS)												
1. Loss of control	22	300	40	15	2832*	381*	0.86*	0.42*	6*	19*	6250*	19048*
2. Thermal		1.5	14700									
Loss of control (H-L-mode transition)	120	3000	40	0	1746	519	0.4	0.8	7	11	Beyond the design basis	Beyond the design basis

Рисунок 2 — Нагрузки на плазмодриемники в ИТЭР

Из различных оценок для ИТЭР [23,24] при ЭЛМах на дивертор будет попадать поток с плотностью мощности в 1-10 ГВт/м², за время 0,3-0,6 мс (Рисунок 2). При тех же событиях поток на бериллиевую стенку меньше: 10-300 МВт/м². При срывах высвобождается энергия с плотностью до 40 МДж/м² в диверторе и 200-480 кДж/м² на стенке. Поток ионов: до $4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (10^{25} - 10^{28} м^{-2} во время срывов). Поток нейтронов: до $10^{18} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

ГДМЛ будет иметь стационарный поток с плотностью 20 МВт/м², при этом можно будет моделировать ЭЛМ и срывы с плотностью мощности до 1 ГВт/м² в повторяющихся импульсах длительностью 1-5 мс. Особенностью линейных систем для удержания плазмы является большой поток частиц и энергии вдоль магнитного поля. На плазмодриемнике будет обеспечен поток частиц до $10^{24} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При таких параметрах происходит сильная эрозия материалов и продукты эрозии существенно влияют на работу реактора. Эти явления необходимо тщательно изучить на экспериментальных установках с наиболее близкими параметрами.

2. Эксперименты на ГОЛ-3

2.1. Установка ГОЛ-3 и позиционирование мишеней

На установке ГОЛ-3 проводятся многочисленные эксперименты по облучению материалов в потоке высокотемпературной плазмы. Например, осенью 2012 года проведена серия экспериментов с образцами из вольфрама. Для характеристики падающего потока был измерен магнитный поток, термодарами контролировалась температура мишени, проводилась диагностика пучка с помощью камеры-обскуры.

Установка ГОЛ-3 состоит из трех частей (Рисунок 3): ускорителя У-2, основного соленоида и выходного узла. Электроны в ускорителе получают энергию порядка 1 МэВ. Созданный мощный (до 50 кА) релятивистский пучок сжимается и инжектируется в основной соленоид, где в дейтериевой плазме с плотностью $n = 10^{14} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$ вследствие развития микротурбулентности пучок теряет до 40% своей энергии, передавая её электронам плазмы [25]. Темп нагрева очень высокий – за 3–4 мкс плазменные электроны нагреваются вплоть до температуры T порядка 5 кэВ, что является мировым рекордом для открытых ловушек.

Сценарий эксперимента следующий: включается ток в катушках соленоида, после чего вакуумная камера установки заполняется рабочим газом (водородом или дейтерием) с концентрацией 10^{14} - 10^{16} см^{-3} . Через 12,5 мс после подачи напряжения на соленоид с помощью выходного узла в камере зажигается разряд и создается предварительная плазма с температурой порядка 0,5-2 эВ, необходимая для достижения макроскопической устойчивости системы электронный пучок - плазма. Часть тока разряда протекает вдоль магнитного поля на всю длину установки, производя ионизацию газа и обеспечивая компенсацию пространственного заряда и тока электронного пучка. Когда ток разряда достигает максимума, в плазму инжектируется электронный пучок, после окончания инъекции пучка плазма остывает за счет продольной электронной теплопроводности.

Для удержания плазмы в ловушке открытого типа необходимо сильное продольное магнитное поле. Гофрированное магнитное поле в ГОЛ-3 создается системой катушек, питаемых конденсаторными батареями. Конфигурация магнитного поля в ГОЛ-3 представлена на Рисунок 4, где красным отмечены силовые линии. Основной 12-метровый соленоид состоит из 55 пробкотронов длиной 22 см.

Максимальное и минимальное поле в пробкотроне ГОЛ-3 : $B_{\max}=4,8$ Тл и $B_{\min}=3,2$ Тл, отсюда пробочное отношение:

$$R = \frac{B_{\max}}{B_{\min}} = 1,5 \quad (2.1)$$

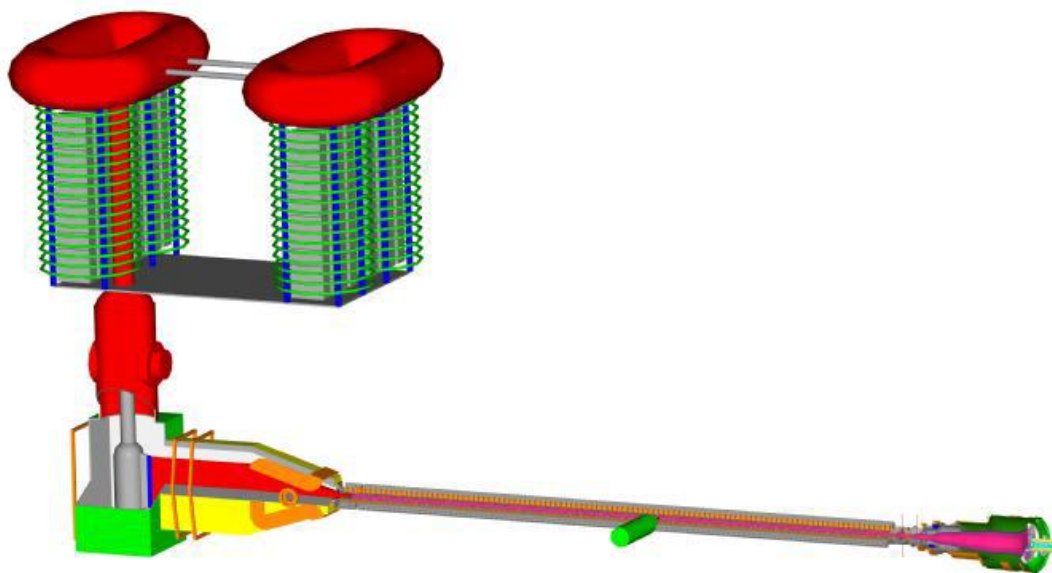


Рисунок 3 — 3D – макет многопробочной ловушки ГОЛ 3

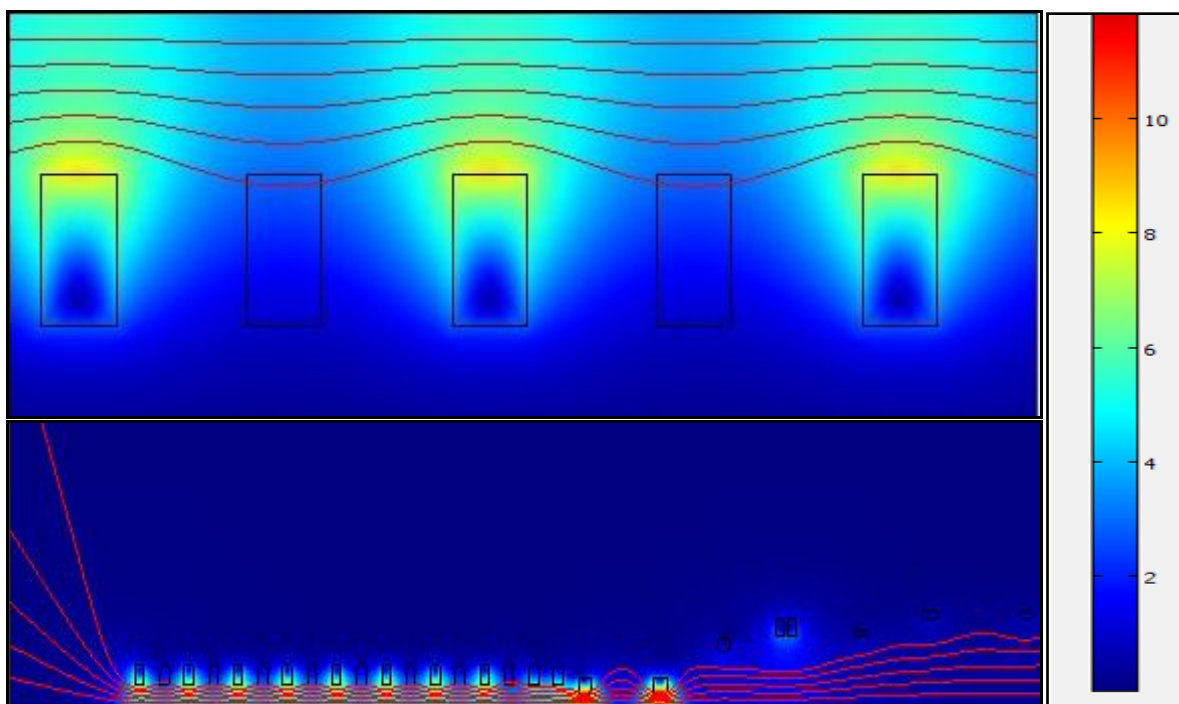


Рисунок 4 — Конфигурация магнитного поля в ГОЛ-3

В выходном узле магнитное поле расширяется и его величина уменьшается на один-два порядка. Именно в этой части установки размещаются образцы материалов для испытания. Был изготовлен держатель (Рисунок 5), в корпус которого встроен нагреватель, способный изменять температуру мишеней до 600°C. В держателе предусмотрены отверстия для термопар, подходящих к задней по отношению к потоку поверхности образцов. В качестве образцов испытывался вольфрам, нарезанный на параллелепипеды 1,2×1,2×0,5 см.

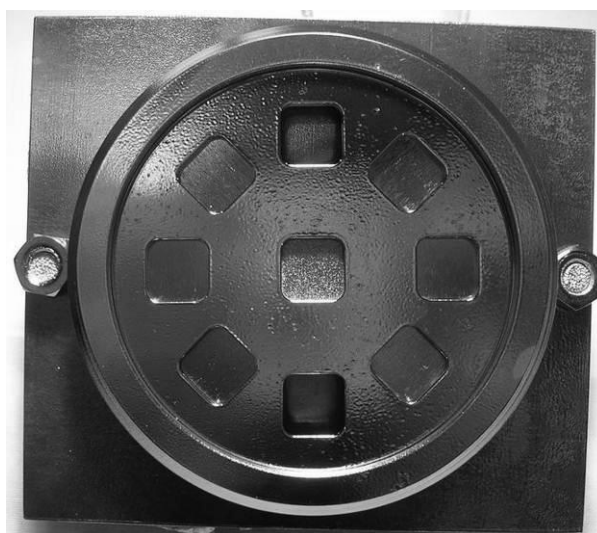


Рисунок 5 — Держатель с образцами из вольфрама

Заряженные частицы плазмы двигаются вдоль силовых линий магнитного поля, тогда магнитный поток через сечение плазмы сохраняется. Известно, что диаметр плазменного столба в сильном поле порядка 4 см, а в расширителе – порядка 50 см, тогда оценим величину магнитного поля в расширителе:

$$B_{расшир} = \frac{B_{max} \cdot S_{max}}{S_{расшир}} = \frac{4,8Тл \cdot \pi \cdot 4 \cdot 10^{-4} м^2}{\pi \cdot 6,25 \cdot 10^{-2} м^2} \cong 3 \cdot 10^{-2} Тл \quad (2.2)$$

Зная энергосодержание пучка и долю магнитного потока, приходящегося на мишень, можно определить плотность мощности падающего потока.

2.2.Измерение потока

Для измерения магнитного потока можно поместить в установку измерительную катушку индуктивности. Величина магнитного поля пропорциональна току в катушке и числу витков в ней:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I \quad (2.3)$$

Поле однородно и прямолинейно, когда соблюдаются все нижеприведенные условия:

- Диаметр катушки много меньше ее длины;
- Расстояние между двумя витками очень мало (им может являться, например, лаковое покрытие провода);
- Величина поля определяется в геометрическом центре катушки, в противном случае, нужно учитывать краевые эффекты.

Так как поток магнитного поля по определению равен

$$\Phi = \iint_s B dS, \quad (2.4)$$

и по закону Фарадея ЭДС в катушке :

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.5)$$

то для среднего значения магнитного поля внутри катушки сечения S , которое отличается от максимального значения из-за неоднородности,

$$B = -\frac{1}{NS} \int E dt. \quad (2.6)$$

Была изготовлена медная катушка с 16 витками и индуктивностью $6,2 \cdot 10^{-7}$ Гн. Для калибровки катушки ее поместили в геометрический центр многослойного соленоида с известными параметрами, диаметр которого в несколько раз превосходит характерные размеры калибруемого образца. Электрическая схема, используемая при калибровке приведена ниже (Рисунок 6). После замыкания ключа в данном L C R контуре происходит переходный процесс характерным временем порядка 30 мс.

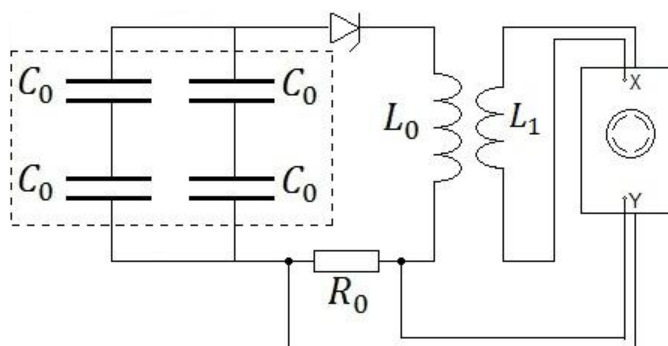


Рисунок 6 — Калибровочный стенд. L_0, L_1 — индуктивность известной и измеряемой катушек соответственно, R_0 — сопротивление шунта, C_0 — емкость конденсатора

С помощью стеновой катушки создается переменное магнитное поле, которое фиксируется измерительной катушкой. Индуктивность стеновой катушки равна 40 мГн. Рассчитанное исходя из тока через стеновую катушку по формуле (2.3) магнитное поле приведено на рисунке (Рисунок 7).

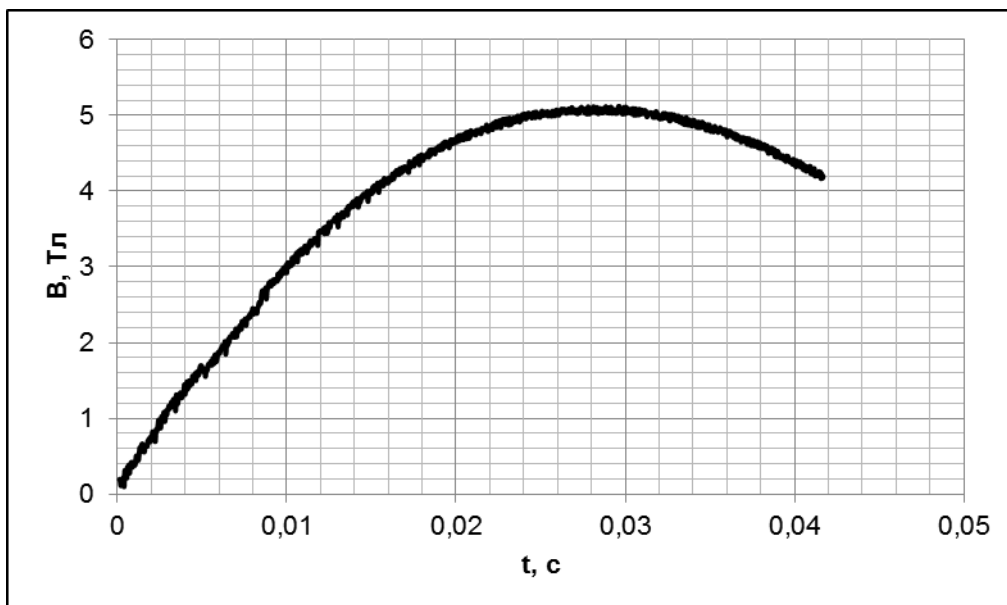


Рисунок 7 — Расчетное значение магнитного поля в центре стеновой катушки

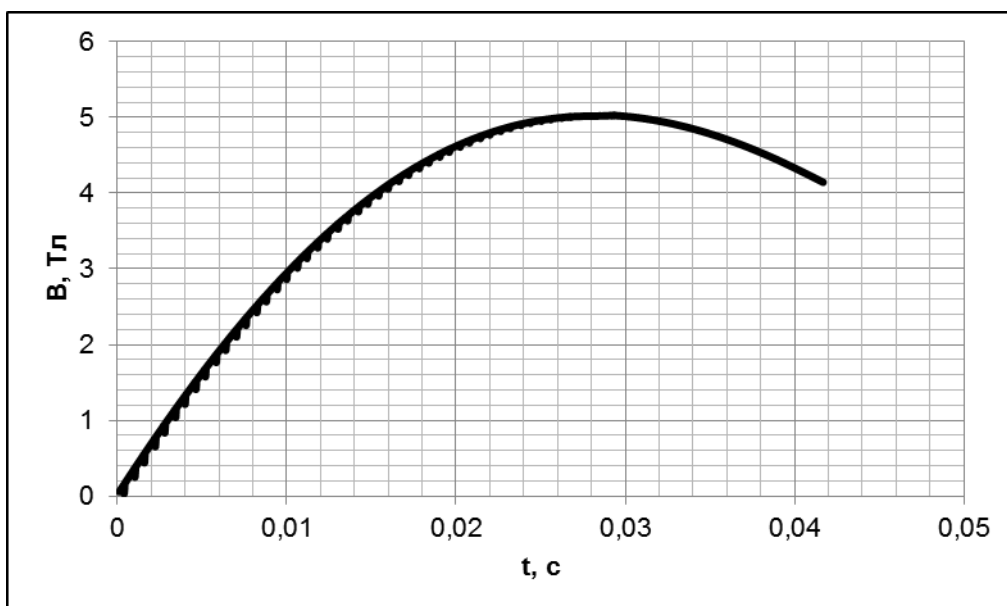


Рисунок 8 — Величина магнитного поля, измеренного катушкой на стенде

Посчитав интеграл (2.6), получим $B(t)$ на стенде (Рисунок 8). Из графиков видно, что теоретические и экспериментальные данные совпадают. Измерительный соленоид помещался в торец установки ГОЛ-3, за мишень с образцами. Магнитное поле в месте установки образцов достигает 0,1 Тл (Рисунок 9). Точность измерения составляет 10%. Поток на мишени, следовательно, примерно равен 1 МДж/м².

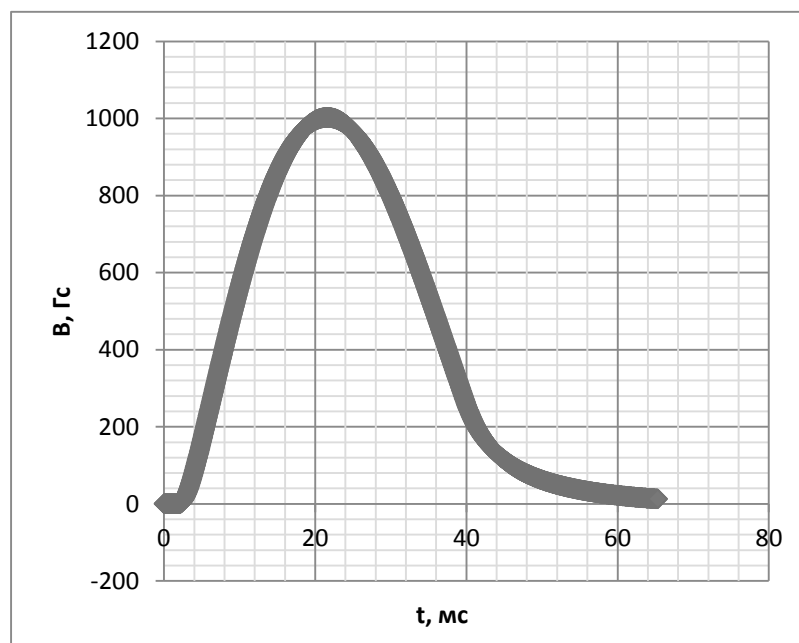


Рисунок 9 — Измеренное $V(t)$ в расширителе ГОЛ-3

2.3. Результаты исследования поверхности

Были проведены серии экспериментов по облучению вольфрама при разной начальной температуре образцов. Получены характерные для потока с плотностью мощности 1 МДж/м^2 изменения поверхности: трещины и кратеры. На рисунке (Рисунок 10) показаны образцы, непосредственно до облучения имевшие комнатную температуру, после 10 выстрелов. Видны трещины, преимущественно совпадающие с направлениями катания и шлифования образцов.

При воздействии потока плазмы, соответствующего условиям в диверторе термоядерной установки, на твёрдые тела на поверхности появляется сеть трещин (Рисунок 10). Характерные размеры таких трещин много больше межатомных расстояний. Это позволяет утверждать, что трещины не являются результатом взаимодействия одиночных частиц плазмы с отдельными атомами твёрдого тела. Появление крупномасштабных трещин должно быть результатом физического процесса, который описывается приближением непрерывной среды для твёрдого тела и потока плазмы, воздействующего на него. [20]

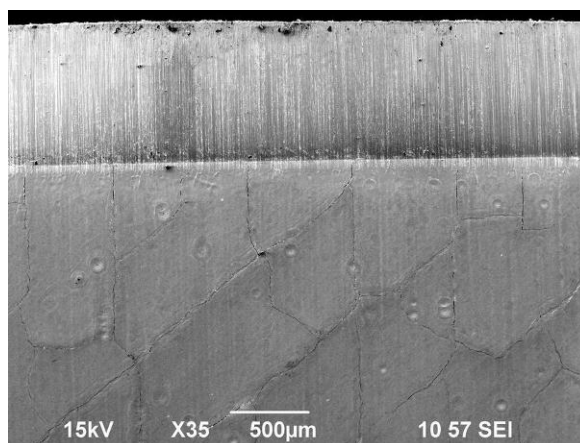


Рисунок 10 — Поверхность вольфрама после облучения потоком плазмы, сверху — необлученная поверхность

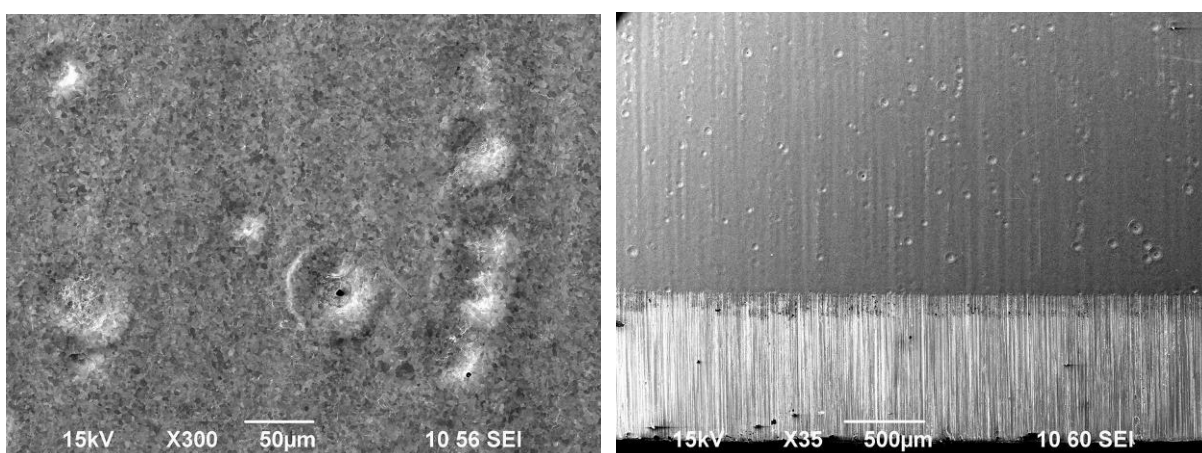


Рисунок 11 — Кратеры на поверхности вольфрама после воздействия потока плазмы, на фотографии справа нижняя часть соответствует необлученной поверхности

При изначальном нагревании трещины на образце из вольфрама не появлялись (Рисунок 11). Это можно объяснить тем, что трещины образуются при резком изменении хрупкости вольфрама, которое обусловлено, в свою очередь, хрупко-вязким переходом при критической температуре. Если образец нагрет изначально, перехода не происходит, соответственно, физические свойства вольфрама не меняются скачкообразно, и образование трещин затруднено.

На образцах были замечены кратеры, в центре которых, исходя из анализа элементного состава, находится пылинка из оксида алюминия (Рисунок 12). Элементный состав был определен с помощью приставки Inca Energy 150 сканирующего микроскопа Jeol JCM5700. Облучаемые 20-кэВными электронами элементы генерируют характеристическое рентгеновское излучение K, L и M серий, которое регистрируется энергодисперсионным полупроводниковым детектором X-Act.

При этом форма такого кратера отличается от ранее наблюдаемых кратеров с термическим механизмом образования (Рисунок 13). Оценим скорость пылинки, образовавшей этот кратер.

Спектр	O	Al	W
Спектр 1			100.0
Спектр 2	48.21	24.34	27.45
Спектр 3	50.18	32.38	17.44

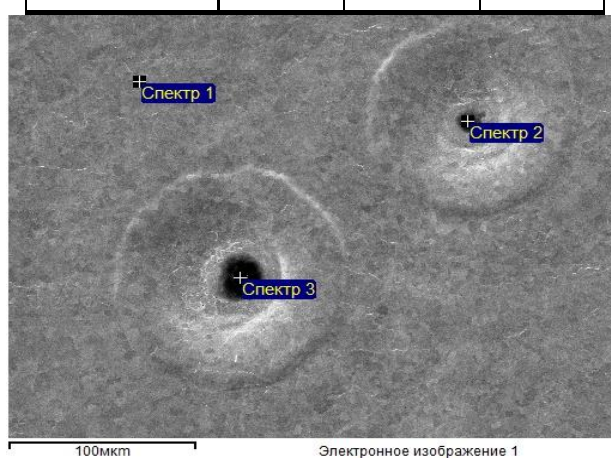


Рисунок 12 — Элементный состав крупинки в центре ударных кратеров

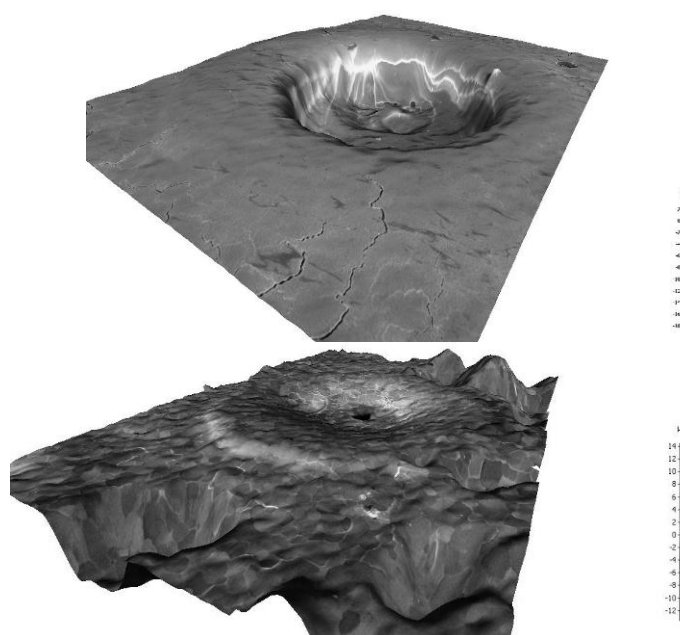


Рисунок 13 — Два типа кратеров: ранее наблюдавшийся сверху и ударного типа снизу

Диаметр кратера связан с плотностью (в г/см³) и энергией (в эрг) пылинки, например, по следующей эмпирической формуле:

$$D = 1,585 \cdot 10^{-3} \rho^{1/6} \beta^{-1/2} E^{0,37}, \quad (2.7)$$

где ρ – плотность пылинки, β – плотность мишени, E – энергия пылинки. Это соотношение было получено для базальтовых мишеней [26] и было проверено для мишени из молибдена [27]. В формуле не учитывается резкое изменение температуры вольфрама, поскольку теплоемкость вольфрама слабо зависит от температуры и в диапазоне до 1500°C изменяется в пределах 10%. Коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, твердость вольфрама также меняются слабо. Из формулы (10) скорость пылинки равна примерно **10 км/с**. При этом можно оценить глубину кратера по следующей эмпирической формуле для кратеров на поверхности Луны:

$$D/d = 4,14 \cdot E^{0,013} (\sin \theta)^{0,2} \approx 4, \quad (2.8)$$

она примерно в 4 раза меньше диаметра кратера, что не соответствует измеренным экспериментально величинам. Это можно объяснить тем, что глубина кратера сильно зависит от твердости мишени, и для вольфрама она заметно выше. В эксперименте на ГОЛ-3 наблюдались кратеры с отношением D/d порядка 15 (Рисунок 14, Рисунок 15, Рисунок 16). Скорость пылинки можно оценить и из теоретических расчетов в гидродинамической модели Э. Эпика [28].

$$D = 1,2d \cdot \left(K v \frac{\rho}{p} \right)^{1/2} (3\beta S)^{-1/4}, \quad (2.9)$$

где

$$p = 1,785 \left[\frac{\rho}{\beta} \right]^{1/2} \left[\frac{v^2}{5S} \right]^{1/30} \approx 1,$$

$$K = c v^2 \left[1 - 0,04 K^2 \right]^{1/2} + 2 \approx 2.$$

Соотношения (2.9) приведены в СГС, $c = 5 \cdot 10^{-13}$, v – скорость пылинки, S – твердость вольфрама. В данном случае скорость пылинки примерно равна **20 км/с**.

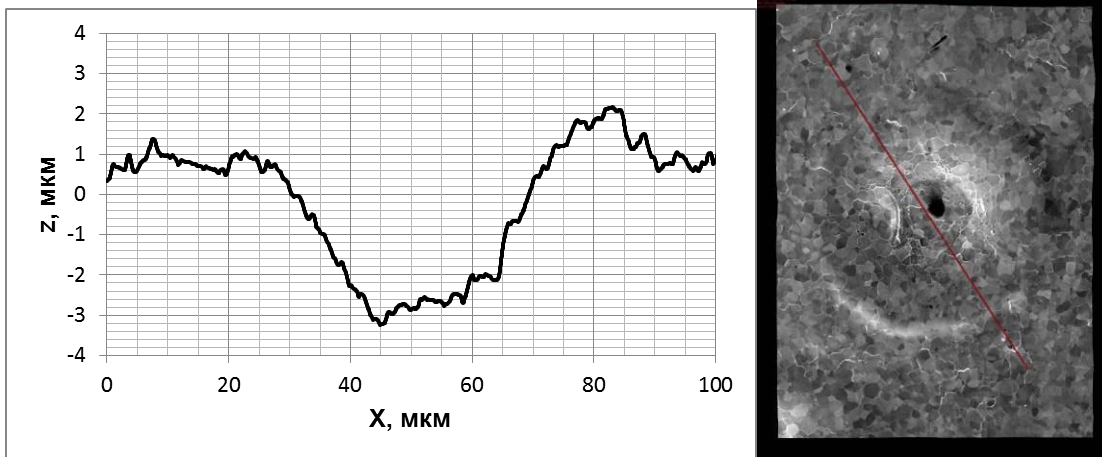


Рисунок 14 — Профиль глубины кратера вдоль направления X, отмеченного линией на фотографии

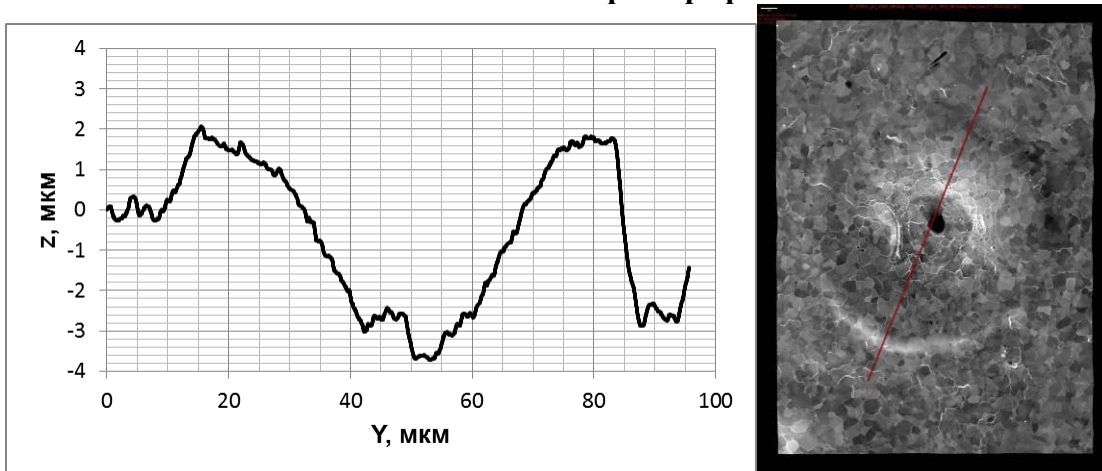


Рисунок 15 — Профиль глубины кратера вдоль направления Y, отмеченного линией на фотографии

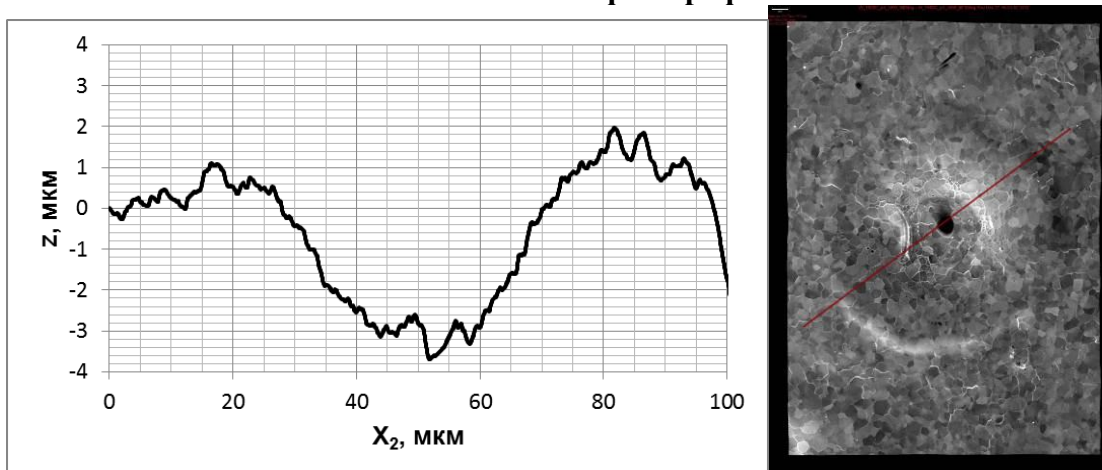


Рисунок 16 — Профиль глубины кратера вдоль направления X₂, отмеченного линией на фотографии

Скорость пылинки, найденная по существующим теоретическим и эмпирическим соотношениям, превосходит скорость потока плазмы в расширителе (порядка 1 км/с),

поэтому необходимо разработать теорию образования ударных кратеров в мишенях, учитывающую условия эксперимента на установке ГОЛ-3.

2.4. Ленгмюровский зонд как одна из диагностик

Для измерения параметров горячей плазмы активно используются зондовые методики, в частности, электростатические зонды Ленгмюра, позволяющие определить локальные значения температуры и плотности плазмы. Они применялись для исследования газовых разрядов еще на рубеже девятнадцатого и двадцатого столетий, например, У. Круксом. Классическая теория работы зонда в плазме без внешнего магнитного поля была разработана Ленгмюром [31, 32, 33]. Относительная простота конструкции зондов Ленгмюра и большой объем получаемой информации делает этот метод одним из важнейших. Следует отметить, что зондовые методики широко используются для измерения параметров околоземной плазмы ($n \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$), плазмы газовых разрядов ($n \sim 10^8 - 10^{16} \text{ см}^{-3}$), периферийной плазмы крупных токамаков ($n \sim 10^{13} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и т.д. [30]. Однако существует множество экспериментальных ситуаций, в которых попытка применения зондов наталкивается на серьезные трудности. Большое число теоретических работ посвящено проблеме возмущения плазмы зондом [34]. С одной стороны, будучи контактным методом диагностики, измерение ленгмюровским зондом обеспечивает локальность определения параметров плазмы. С другой стороны, контактный характер измерений приводит к возмущению плазмы в некоторой области около зонда. Характерные размеры такой области определяются дебаевским радиусом экранирования и, как правило, оказываются существенно меньше размеров плазменного объема для горячей плазмы. Наиболее важными объектами, потребовавшими развития классической теории зондов, явились замагниченная плазма и плазма при высоком давлении [35].

В 2008 году было решено создать систему из тройных зондов Ленгмюра для изучения поведения плазмы в магнитном поле расширителя ГОЛ-3, а также для исследования мишенной плазмы вблизи поверхности образцов. Эта диагностика позволяла определять температуру и плотность плазмы в произвольной точке расширителя за счет подвижного механизма позиционирования зондов. Была разработана соответствующая электрическая схема включения и питания зонда. Эти разработки легли в основу диагностики для определения параметров плазмы, создаваемой новой плазменной пушкой на установке ГОЛ-3. Электрическая схема была адаптирована для новых условий эксперимента.

Одиночный электрический зонд Ленгмюра представляет собой тонкую металлическую проволочку, которая изолируется по всей длине, кроме самого кончика. Электрическое поле, возникающее при подаче на зонд напряжения, меняет характер движения заряженных частиц вблизи него и их плотность. Электрическое поле, возникающее при подаче на зонд напряжения, меняет характер движения заряженных частиц вблизи него и их плотность. Зонд, работающий в режиме отталкивания частиц одного сорта, например электронов, создает вокруг себя область, где плотность частиц другого сорта выше, чем в окружающей невозмущенной плазме. Легче всего оценить размеры этого переходного слоя при больших разностях потенциала между зондом и плазмой. Тогда можно считать, что переходный слой работает как диод, ток в котором ограничен полем пространственного заряда собираемых зондом частиц. На внешнюю границу слоя поступает поток частиц, равный по порядку величины тепловому $-\frac{n_e v_T}{4}$. Толщина слоя при изменении напряжения подстраивается под эту плотность тока, следуя закону "трех вторых":

$$j \propto \frac{\sqrt{e} U^{3/2}}{9\pi \sqrt{m} \cdot d^2}, \quad (2.10)$$

где m - масса частиц, d - размер слоя. Самым простым является случай, когда толщина слоя пространственного заряда вокруг зонда мала по сравнению с его характерным размером. Тогда задача о нахождении тока на зонд в зависимости от потенциала на нем становится фактически одномерной.

Если зонд находится под большим отрицательным потенциалом по отношению к окружающей плазме, то электроны не могут попасть на зонд. В этом случае *все* ионы, попадающие на внешнюю границу слоя, попадают на зонд, и плотность тока на него не зависит от потенциала и равна ионному току насыщения. Если же потенциал на зонде положительный и достаточно большой (чтобы ионы не могли попасть на него), все электроны, попадающие на границу слоя, собираются зондом и плотность тока равна электронному току насыщения. Плотность электронного тока насыщения равна

$$j_e = \frac{en_e v_T}{4}. \quad (2.11)$$

В реальных условиях насыщение чаще всего отсутствует, в особенности это касается электронной части характеристики зонда. Причин тому может быть несколько,

в частности, с ростом потенциала на зонде увеличивается толщина слоя и эффективная площадь собирающей поверхности зонда. По мере уменьшения отрицательного потенциала на зонде ток ионов на него не меняется и по-прежнему равняется ионному току насыщения. Вместе с тем его теперь могут достичь все больше и больше электронов, преодолевающих потенциальный барьер, так что в какой-то момент суммарный ток на зонд оказывается равным нулю. При этом говорят, что зонд находится под плавающим потенциалом (U_p) по отношению к плазме. Именно этот потенциал приобретает помещенное в плазму изолированное тело. Его величина определяется балансом ионного тока насыщения

$$j_i = \frac{en_e v_{Ti}}{4}, \quad (2.12)$$

и тока электронов

$$\frac{en_e v_{Te}}{4} \cdot e^{-\frac{eU}{T_e}} \quad (2.13)$$

с энергиями, превышающими потенциальный барьер eU_p . Принимая температуры ионов и электронов равными, получаем отсюда следующую оценку [29] плавающего потенциала одиночного зонда в водородной плазме:

$$U_p = \frac{T}{e} \cdot \ln \sqrt{\frac{M}{m}} \approx 3.8 T/e. \quad (2.14)$$

Привлекательной особенностью тройных зондов Ленгмюра является возможность одновременного определения плотности и температуры сравнительно простым способом, не требующим измерения вольтамперной характеристики зонда, более того, вообще не меняя напряжений на электродах зонда. Такой зонд имеет три одинаковых, близко расположенных электрода.

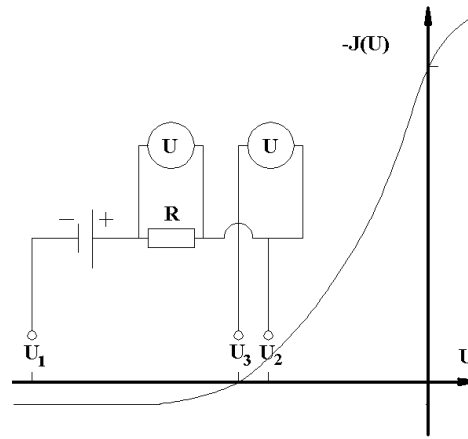


Рисунок 17 — Схема включения тройного зонда

Два из них включаются по схеме двойного зонда, причем величина поданного напряжения выбирается из условия, чтобы двойной зонд работал в режиме насыщения. Третий электрод является плавающим. На рисунке изображена примерная вольт-амперная характеристика одиночного зонда и потенциалы электродов тройного зонда (Рисунок 17). Между парой электродов, образующих двойной зонд (электроды 1 и 2), прикладывается потенциал, много больший T_e/e . При этом электрод 1, находящийся под отрицательным потенциалом, отталкивает все электроны и ток на него равен ионному току насыщения. На электрод 2 потенциал которого по отношению к плазме также отрицателен, идет тоже ионный ток насыщения и вдвое больший электронный ток. При этом суммарный ток на оба электрода зонда равен нулю, как того требует уравнение непрерывности для стационарных условий. Потенциал электрода 3 можно найти из соотношения

$$2 \cdot \frac{en}{4} \langle v_i \rangle = \frac{en}{4} \langle v_e \rangle \cdot e^{-eU_2/T_e} . \quad (2.15)$$

Зонд 3 находится под плавающим потенциалом и, следовательно,

$$\frac{en}{4} \langle v_i \rangle = \frac{en}{4} \langle v_e \rangle \cdot e^{-eU_3/T_e} . \quad (2.16)$$

Измеряя разность потенциалов между зондами 2 и 3, можно определить электронную температуру из соотношения

$$T_e = e(U_2 - U_3)/\ln 2 . \quad (2.17)$$

Зная электронную температуру и ток насыщения двойного зонда 1-2, можно найти плотность плазмы.

Для измерения параметров плазмы в восьмиоконной камере ГОЛ-3 зонд помещался внутрь камеры через вакуумное соединение Вильсона. Конструкция используемого в эксперименте зонда показана на рисунке (Рисунок 18). Длина неизолированной части вольфрамовой проволоки $l = 3$ мм, диаметр проволоки $d = 0,4$ мм. Длина всей металлической трубки от контактов до кончика зонда составляет примерно 1 метр, что позволяет перемещать зонд в любую точку камеры.

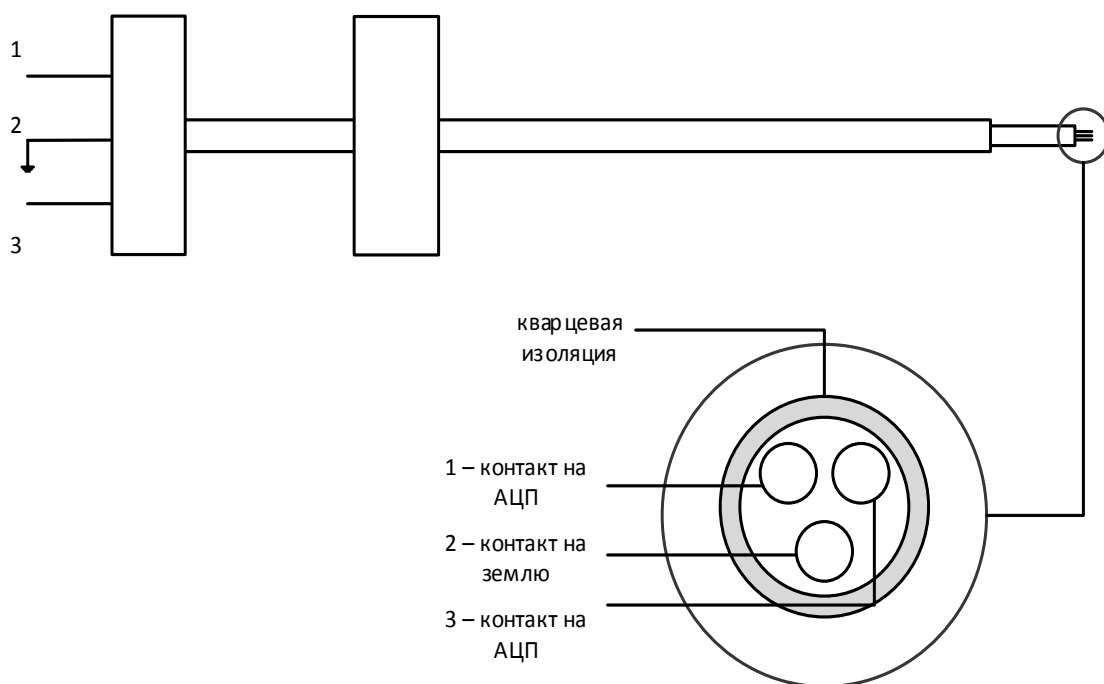


Рисунок 18 — Конструкция тройного зонда Ленгмюра

Поскольку индукция магнитного поля в расширителе составляет от 5 Тл в самом его начале до 0,1 Тл в конце, плазма в нем сильно замагничена, что оказывает влияние на режим работы зонда. Оценим ларморовские радиусы для ионов и электронов, находящихся в потоке, для этого выберем значение индукции $B \approx 1$ Тл в восьмиоконной бочке. При этом $\rho_{iL} = 0,2$ мм, $\rho_{eL} = 5$ мкм. Как видно, обе величины меньше диаметра проволоки, поэтому зонд можно рассматривать как плоский (частицы не попадают на обратную по отношению к потоку плазмы сторону зонда).

В процессе измерений электроды зонда и измерительная схема "плавают" вместе с изменяющимся во времени потенциалом плазмы. Часто для гальванической развязки от регистрирующей аппаратуры применяются оптронные преобразователи с малой

проходной емкостью (~ 0.25 пФ). Это позволяет избежать влияния помех, вызываемых высокочастотными колебаниями потенциала плазмы. Зонд подключается к АЦП по нижеприведенной схеме (Рисунок 19).

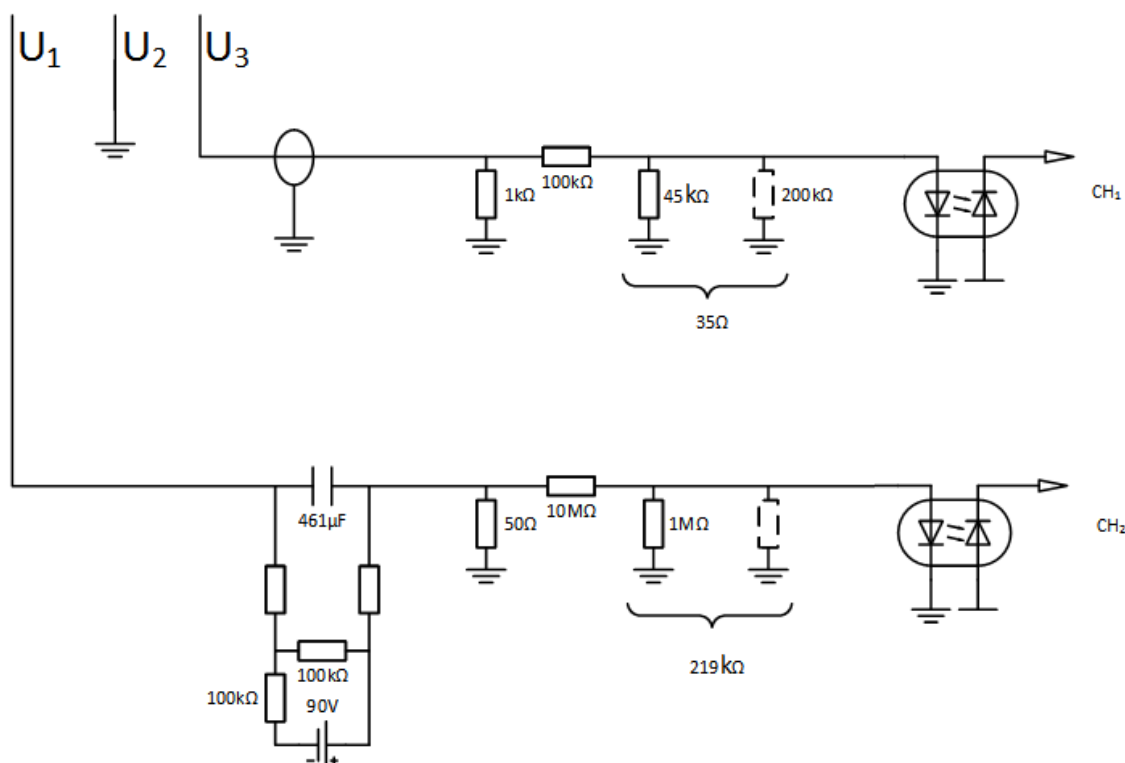


Рисунок 19 — Электрическая схема включения и питания тройного зонда Ленгмюра на установке ГОЛ-3

CH_1 и CH_2 здесь обозначают каналы выходов на АЦП. Развязки на каждом из каналов измерения используются для устранения шумов и наводок.

Температура плазмы в эксперименте находится из (2.17). Заметим, что плазма в эксперименте считается равновесной, с одинаковой температурой ионов и электронов. Конечно, разность $U_2 - U_3$ даже до регистрирования потока будет не равна нулю из-за наводок, поэтому среднее значение до регистрирования плазмы и после принимается за 0. Логично сразу найти калибровочный коэффициент $C_T = e/\ln 2 = 0,179 \text{ эВ/В}$. Плотность, в свою очередь, находится из следующих соображений: $I = j_{i0} S$, где S – это площадь зонда, работающего в режиме плоского.

$$j_{i0} = 0,6e \cdot n \cdot c(T(\text{эВ})/Mc^2)^{0,5}; \quad I = C_{ji} \cdot n \cdot T^{0,5}; \quad C_{ji} = 9,6 \cdot 10^{13} (\text{эВ} \cdot \text{см}^3)^{-1}.$$

Пример обработанных данных приведен на графиках плотности и температуры (Рисунок 20, Рисунок 21).

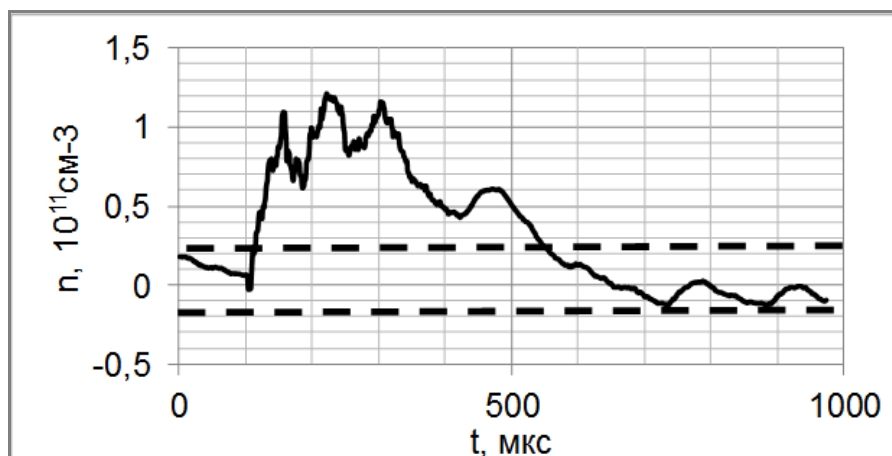


Рисунок 20 — Динамика плотности плазмы в выходном узле ГОЛ-3, выстрел №12793

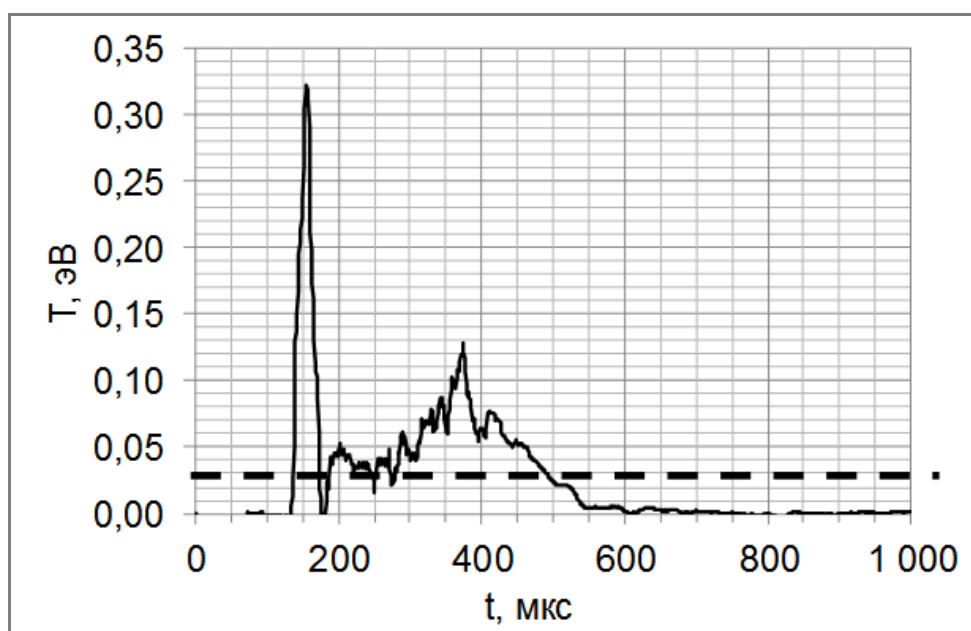


Рисунок 21 — Динамика температуры плазмы в выходном узле ГОЛ-3, выстрел №12793

Горизонтальными штриховыми линиями здесь показана погрешность, вызванная шумами и наводками в цепи подключения к АЦП. Во всех случаях ее значение оказалось большим, чем значение любой другой погрешности. Из графиков можно сделать вывод, что плазма крайне неоднородна как по температуре, так и по плотности. Таким образом температура плазмы составляет порядка 0,1-0,5 эВ, а плотность порядка 10^{11} см^{-3} . Полученные значения соответствуют параметрам газового разряда, и диагностика с помощью тройного зонда Ленгмюра может считаться надежной и использоваться для температур до десятков эВ и плотностей до 10^{14} см^{-3} , например, для исследования мишенной плазмы при испытании материалов.

3. ГДМЛ

3.1. ГДМЛ

Линейная термоядерная ловушка ГДМЛ будет построена на основе осесимметричного пробкотрона с плещущимися ионами, напоминающего центральную часть газодинамической ловушки ГДЛ в ИЯФ СО РАН. В таком пробкотроне быстрые ионы термоядерного топлива, захваченные в плазме из пучков системы атомарной инжекции, взаимодействуют между собой и с фоновой плазмой, порождая реакции синтеза. Если температура электронов и фоновой плазмы относительно низкая, то торможение ионов пучка на электронах происходит быстрее рассеяния в конус потерь. Это позволяет накапливать в таких системах сгустки плотной и горячей плазмы с большим термоядерным выходом, причём зоны инжекции пучков и зоны термоядерных реакций могут быть пространственно разделены. Продольные потоки плазмы в пробках даже превышают по плотности необходимые для исследования взаимодействия плазмы с материалами.

Поскольку выгодно распределить энергетическую нагрузку на возможно большую поверхность стенки, в расширителе магнитные силовые линии расходятся конусом от выходной пробки системы к плазмоприёмнику. Степень расширения поля должна быть достаточна для распределения полной мощности продольных потерь ниже допустимого уровня для материала стенки. Кроме этой очевидной функции теплосъёма и рециркуляции, расширитель выполняет и другие важнейшие функции, основанные на воздействии на плазму вдоль магнитного поля. Первая из них – электронная термоизоляция. Как показано в теории и в экспериментах на ГДЛ, если степень расширения поля превышает корень из отношения масс иона и электрона плазмы, то в объёме расширителя формируется электростатический потенциальный барьер, отражающий обратно в ловушку подавляющую часть влетающих в расширитель электронов. В результате тепловой поток на плазмоприёмник по электронному каналу ограничивается, и суммарные потери энергии не превышают δT_e на каждый покидающий ловушку ион. Таким образом, задача подавления продольных потерь сводится к снижению потока ионов, покидающих ловушку.

Если ловушка работает в режиме близком к гидродинамическому, плотность потока частиц на входе в расширитель оценивается как произведение плотности на тепловую скорость ионов:

$$F_n \approx n_l v_{Ti} \quad (3.1)$$

Длительность разряда установки должна быть максимально возможной, но не менее 1 с. Для испытания материалов требуется непрерывная работа в течение нескольких часов. Магнитное поле должно быть максимальным при условии совместимости с требованием квазистационарности на времени разряда. В режимах с атомарной инжекцией оптимум будет находиться вблизи 10^{14} см^{-3} по условию захвата атомарных пучков (с энергией 40 кэВ). Системы должны быть работоспособны в диапазоне плотностей 10^{13} - 10^{15} см^{-3} . Температура электронной компоненты и фоновой плазмы может сильно различаться при разных составах ловушки и способах нагрева. Однако основные системы должны быть работоспособны при температурах от 50 до 1500 эВ. Диагностики и системы для исследования взаимодействия плазмы с материалами должны быть работоспособны при температурах в диапазоне 0,1-100 эВ.

Особенностью линейных систем для удержания плазмы является большой поток частиц и энергии вдоль магнитного поля. В существующих и перспективных установках практически вся энергия, вводимая в плазму, выносится из ловушки вдоль силовых линий магнитного поля на торцевые плазмоприемники. В проекте ГДМЛ основными источниками нагрева являются пучки нейтралов (суммарная захваченная мощность 10 МВт) и электронные пучки, инжектируемые с торцов установки, также с суммарной мощностью 10 МВт. В стационарном случае вся мощность, вводимая в плазму, выносится на торцевые плазмоприемники. Максимальный поток энергии (в сильном поле многопробочных секций) составляет

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{20 \text{ МВт}}{\pi(0.1 \text{ м})^2} \cdot \frac{7 \text{ Тл}}{0.7 \text{ Тл}} = 3.2 \text{ ГВт/м}^2 \quad (3.2)$$

Предполагаемая величина потока мощности вдоль поля в расширителе будет составлять $\sim 20 \text{ МВт/м}^2$.

3.2. ГДМЛ–Т для испытания материалов

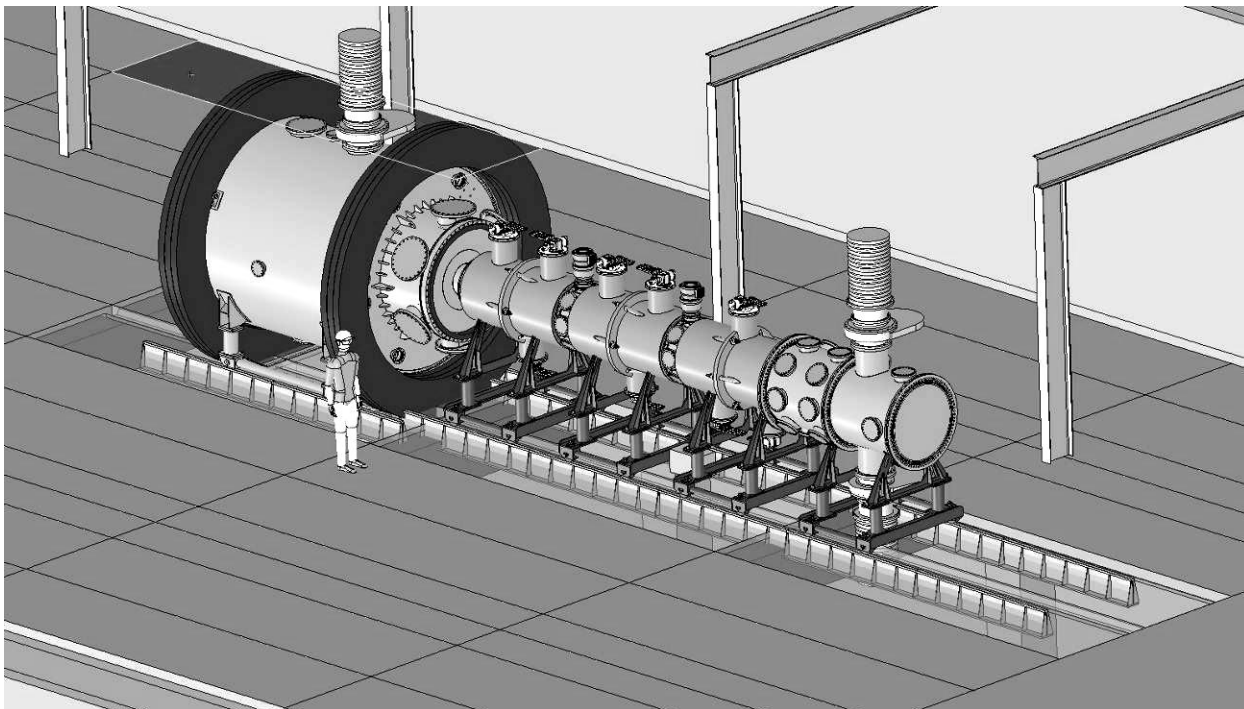


Рисунок 22 — Конфигурация ГДМЛ-Т

Постановка некоторых важных для термоядерной программы экспериментов по исследованию взаимодействия плазмы с поверхностью не требует сооружения полномасштабной установки и может быть выполнена с использованием отдельных элементов, создаваемых в рамках проекта ГДМЛ. Проведение таких экспериментов позволяет совместить инженерные работы по вводу и запуску оборудования с физическими исследованиями, в ходе которых будут получены данные, необходимые для успешной разработки выходной секции установки ГДМЛ. В рамках этого подхода предполагается в качестве первого этапа работ по проекту ГДМЛ создать установку для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью, представляющую собой прототип выходной секции установки ГДМЛ, ГДМЛ-Т. Сверхпроводящая линейная ловушка ГДМЛ-Т, будучи первой стадией проекта ГДМЛ будет создана главным образом для исследования взаимодействия плазмы с материалами в режимах с предельными тепловыми нагрузками, до 10 МВт/м^2 и до 1 ГВт/м^2 в импульсах 1-5 мс. Параметры ГДМЛ-Т, следовательно, воспроизводят нагрузки на дивертор ИТЭРа.

Эта система состоит из трёх секций - сверхпроводящих соленоидов с гофрированным магнитным полем и расширителя (Рисунок 22). Магнитное поле, создаваемое сверхпроводящими соленоидами, достигнет 7 Тл. На торце установки будет располагаться камера с плазмopриёмником для испытания материалов. В стыках многопробочных секций расположены многофункциональные сервисные ячейки с

портами для диагностики, нагрева и поддержания плазмы. В расширителе предполагается разместить дуговой источник плазмы, аналогичный испытанному в экспериментах главы 2, и прототип инжектора электронного пучка. Схема установки показана на рисунке (Рисунок 22).

В установке в сильном магнитном поле с помощью геликонного разряда будет создаваться стационарная плазма с плотностью до 10^{14} см^{-3} и температурой 1-10 эВ. С помощью инжекции электронного пучка мишени будут подвергаться импульсно-периодическим тепловым нагрузкам с длительностью импульсов 0,1-1 мс, скважностью 1000 и средней плотностью мощности $\sim 1 \text{ МВт/м}^2$. Такое воздействие на мишени хорошо моделирует действие плазмы на диверторные пластины в токамаке ITER, включающее в себя воздействие стационарного потока плазмы и частиц и периодический выброс на дивертор части энергии плазменного столба вследствие магнитогидродинамических событий на периферии плазмы, ЭЛМов.

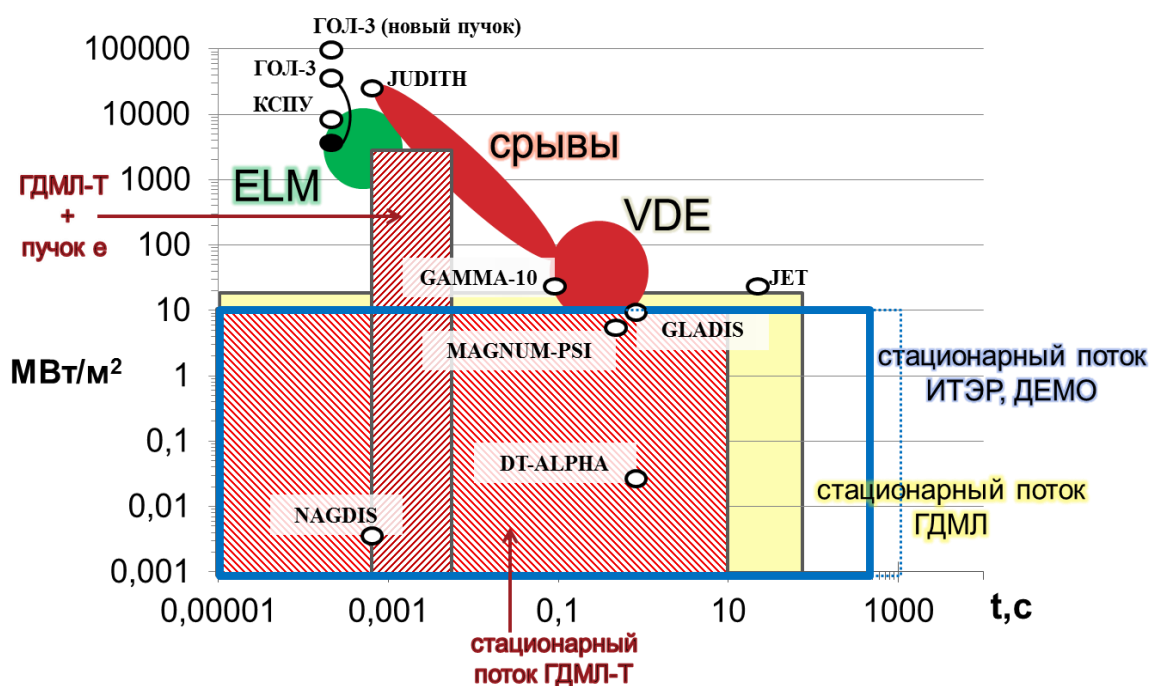


Рисунок 23 — Плотность мощности теплового потока на плазмодриемники существующих и будущих установок в зависимости от длительности потока

На рисунке (Рисунок 23) для сравнения изображены нагрузки на дивертор в ИТЭР в стационарном режиме, принятые аналогичными но с большей длительностью нагрузки в реакторе ДЕМО. В ДЕМО тепловая нагрузка на диверторные пластины может значительно превышать величину $\sim 10 \text{ МВт/м}^2$, но поскольку эта величина -

техническое ограничение работоспособности дивертора, тепловую нагрузку планируется уменьшать всеми возможными способами.

Нагрузки при ЭЛМах в реакторе типа ИТЭР выделены зеленым, а при срывах (и предшествующих им смещениях) - красным. Кружками показаны рекордные по мощности параметры действующих установок: ГОЛ-3, в том числе представленная в данной работе серия экспериментов с вольфрамом, электронного пучка JUDITH, плазменных установок КСПУ, ГАММА-10 и других. Стационарный поток в ГДМЛ указан желтым цветом. Параметры ГДМЛ-Т, в стационаре и в импульсах с электронным пучком, следовательно, воспроизводят нагрузки на дивертор ИТЭРа, заполняя весь диапазон, поскольку нагрузку на мишень можно изменять, варьируя магнитное поле на мишени. ГДМЛ-Т также сможет тестировать материалы для ГДМЛ.

Основными задачами экспериментов на установке является определение скорости эрозии поверхности плазмоприемников под действием мощного плазменного потока, исследование механизмов эрозии, процессов накопления трития в мишени и его экстракции, а также определение параметров поверхностной плазмы для верификации численных кодов, описывающих процессы взаимодействия плазмы с поверхностью. В научные задачи ГДМЛ входят также разработка технологии инжекции электронных пучков и отработка технологии квазистационарных источников плазмы и рециркуляции газа.

Материалы, которые следует испытать в ходе экспериментов определяются тем, выдержат ли они реакторные нагрузки. Тепловой поток за рабочий цикл горения плазмы при наличии соответствующего теплоотвода могли бы выдержать графит и его соединения, медь, вольфрам, молибден, тантал. При этом тугоплавкие металлы из-за высоких значений Z могут нарушить условия самоподдерживания термоядерной реакции.

Проблема снятия больших тепловых нагрузок в термоядерных исследованиях ранее решалась в связи с разработкой приемников пучков для мощных инжекторов нейтралов. Известны конструкции, позволяющие, при использовании активного водяного охлаждения, снимать до 100 МВт/м^2 в импульсах с длительностью 1,5 с, в ИЯФ СО РАН есть опыт создания и эксплуатации подобных устройств. Такие приемники пучков представляют собой, как правило, наборы медных труб с установленными внутри завихрителями потока. Однако медь не годится для реактора типа ИТЭР из-за сильного распыления и долгоживущей наведенной активности, поэтому имеет смысл испытывать образцы из меди только для открытых систем.

Тантал и молибден перспективны в силу своей тугоплавкости и радиационной стойкости. Также в рамках работ над проектом ИТЭР разработаны вольфрамовые и углеродные элементы плазмодриемников с активным охлаждением, способные работать при стационарных потоках до 20 МВт/м^2 [4]. Недостатком углерода является сильное распыление и большой захват трития. Вольфрам так же, как молибден, является тугоплавким металлом и имеет самую высокую среди всех металлов температуру плавления — $3410 \text{ }^\circ\text{C}$.

Исследования плазмодриемников необходимы, в первую очередь, для разработки концепции установки реакторного класса с линейной конфигурацией магнитного поля. Для разработки такой установки необходима информация о поведении конструктивных элементов под действием предельных тепловых нагрузок и ионной бомбардировки, скорости и механизмах эрозии поверхности, образовании и миграции пылевых частиц. Критическим вопросом создания плазмодриемников является их ресурс, который в значительной степени определяется эффектами термоциклирования. Для описанных в литературе устройств желаемый ресурс составлял $\sim 10^4$ импульсов. В то же время на установке ГДМЛ тепловая нагрузка на плазмодриемники будет складываться из квазистационарной тепловой нагрузки от потока плазмы, вытекающей из ловушки (ионы с энергиями несколько кэВ), и импульсно-периодической нагрузки от электронного пучка (электроны с энергией десятки кэВ) с длительностью импульса 10-100 мкс и скважностью 10-100. Информации о поведении конструктивных материалов под действием такой нагрузки в настоящее время нет.

Еще одним важным вопросом является скорость эрозии поверхности плазмодриемников. Если принять, что поток энергии на плазмодриемник равен 20 МВт/м^2 и средняя энергия иона в потоке равна 4 кэВ, поток частиц на поверхности равен $2.5 \times 10^{22} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Физическое распыление, при коэффициенте распыления 0,02, приводит к эрозии 20 нм за импульс или 0,2 мм за 10^4 импульсов.

Существенно большая скорость эрозии может возникать из-за накопления водорода в материале плазмодриемников, в частности, вследствие блистеринга. Хорошо известно, что эффекты блистеринга существенны при облучении медных мишеней потоком высокоэнергетичных ионов (с энергиями в десятки кэВ) при флюенсах 10^{22} - 10^{23} м^{-2} .

Установка ГДМЛ-Т имеет следующие преимущества для постановки экспериментов по взаимодействию плазмы с поверхностью:

- высокая плотность мощности и полная мощность в квазистационарном плазменном потоке, падающем на поверхность;
- возможность регулирования мощности (в том числе - в течение импульса) изменением параметров инжекции и величины магнитного поля на мишени;
- возможность моделирования мощных импульсно-периодических нагрузок (моделирование событий ЭЛМ в токамаке) при инжекции электронного пучка;
- относительная доступность области взаимодействия плазмы с поверхностью, позволяющая размещать исследуемые элементы различной конфигурации и диагностическое оборудование
- простая аксиально-симметричная геометрия, облегчающая моделирование процессов взаимодействия плазмы с поверхностью.
- сильное магнитное поле на мишени, что важно для изучения транспорта пыли и примесей.

При этом существуют и характерные для этой установки сложности: поддержание стационарности и однородности плазмы, откачка и рециркуляция газа (необходима высокая скорость вакуумной откачки) и загрязнение плазмы примесями. Наличие примесей приводит к увеличению радиационных потерь, увеличению эффективного заряда плазмы, приводящего к ускоренному рассеянию быстрых ионов, и уменьшению концентрации ионов мишенной плазмы и, соответственно, нейтронного выхода. Все эти эффекты значительно влияют на удержание плазмы.

Основными источниками примесей в установке являются остаточный газ, находящийся в вакуумном объеме и абсорбированный на поверхности вакуумной камеры, распыляемые торцевые плазмодриемники, приемники нейтральных пучков, первая стенка и лимитер, а также ускоренные частицы, инжектируемые системой нейтральной инжекции.

Считается, что одним из достоинств открытых ловушек является отсутствие накопления примесей, и соответственно их малая концентрация и влияние на энергобаланс. В случае установки ГДМЛ это верно только в определенной степени. В газодинамическом режиме время удержания иона пропорционально корню из его массы и составляет несколько миллисекунд. Однако в случае рециркуляции газа примеси из расширителя будут возвращаться в центральный соленоид и снова поступать в плазму. При этом, поскольку для хорошего удержания быстрых ионов

необходимо, чтобы плазма имела резкую границу, а вихревое удержание плазмы связано с перемешиванием центральной части плазменного столба, высока вероятность проникновения низкоионизованных ионов примесей в центральную часть плазмы.

Таким образом, для ГДМЛ-Т сформулированы задачи:

- Испытания плазмоприемников в условиях, похожих на ИТЭР и ДЕМО, а именно: определение скорости эрозии, исследование механизмов эрозии, определение параметров поверхностной плазмы для верификации численных кодов, описывающих процессы взаимодействия плазмы с поверхностью;
- Изучение динамики топлива и примесей для ГДМЛ;
- Изучение взаимодействия электронного пучка и плазмы и многопробочного удержания.

Запланированы эксперименты по изучению взаимодействия плотных потоков плазмы с образцами из меди, вольфрама, молибдена, тантала и графита в сильном магнитном поле ГДМЛ-Т.

Для изучения всех возникающих эффектов выбраны следующие диагностики:

Динамика температуры поверхности мишени	термопары, обзорный спектрометр (СП-48) 0.5 нм
Динамика температуры и плотности поверхностной плазмы	спектрометр высокого разрешения (ДФС-24) 0,05 нм, система тройных зондов Ленгмюра, лазерное рассеяние, интерферометрия, атомарные пучки
Состав плазмы (примеси)	обзорный спектрометр
Определение скорости диффузии поверхностной плазмы	ВУФ-спектрометр с пространственным и временным разрешением, камеры
Исследование размеров частиц пыли, изучение путей и скорости миграции примесей	пылеприемники, обзорный спектрометр, высокоскоростные камеры
Анализ электронного пучка 100 кэВ	магнитный анализатор - спектр, рентгеновская камера-обскура – пространственная однородность
Поток энергии	болометры

Во всех экспериментах необходимо контролировать поток на образцы и их температуру. С первых же микросекунд воздействия плазмы на мишень возникает экранирующее облако мишенной плазмы, поэтому нужно измерять свойства

падающего потока, например, болометром перед мишенью, а также анализируя спектр и пространственное распределение пучка электронов для импульсных нагрузок, и мощность, попавшую на мишень непосредственно (с помощью термопар и обзорного спектрометра).

Для изучения механизмов эрозии во время эксперимента нужно следить за вылетом капель с помощью высокоскоростной камеры, а после – исследовать поверхность и проанализировать содержимое пылесборников и приемников капель.

Чтобы проверить моделирование динамики поверхностной плазмы, нужно провести спектроскопические измерения высокого разрешения для определения температуры, плотности и степени ионизации. Температуру и плотность локально можно измерить ленгмюровскими зондами, а плотность и томсоновским рассеянием.

Для изучения состава и перемещения примесей, необходим обзорный спектрометр, ВУФ-спектрометр с пространственным и временным разрешением для вольфрама, а также пылеприемники на различных расстояниях от мишени.

Для всех этапов исследований будут использоваться цифровые камеры.

Заключение

Одной из основных задач разработки термоядерного реактора нового поколения является выбор материалов, устойчивых к высоким тепловым нагрузкам порядка 0,1-20 МДж/м². При таких параметрах происходит сильная эрозия материалов, и продукты эрозии существенно влияют на работу реактора. На многопробочной ловушке ГОЛ-3 проведены эксперименты по взаимодействию мощного потока плазмы и материалов плазмоприемников, в том числе эксперименты с образцами из вольфрама. Исследована эрозия образцов из вольфрама после их облучения при средних нагрузках порядка 1 МДж/м² в расширителе ГОЛ-3. Даже при таком значении плотности потока поверхность мишеней подвергается значительным изменениям, откуда можно заключить, что уровень эрозии слишком велик для использования вольфрама в условиях работы термоядерного реактора. Для дальнейшего изучения стойкости материалов необходимы установки с параметрами более близкими к параметрам ИТЭР или ДЕМО.

Для проведения экспериментов с образцами из вольфрама разработаны соответствующие задаче диагностики плотности потока энергии, а также сконструирован держатель мишеней. После серии «выстрелов» было обнаружено формирование трещин и кратеров двух типов, один из которых образуется в результате удара пылинки Al₂O₃. Скорость такой пылинки, исходя из размеров кратера и грубой теоретической оценки, примерно равна 10 км/с. Более точная теоретическая модель на данный момент не разработана.

Показано, что ГДМЛ-Т, в отличие от действующих установок, будет способна генерировать как стационарный плазменный поток так и моделировать импульсные процессы типа ELM и срывов в реакторах ИТЭР и ДЕМО. Был разработан план экспериментов по изучению взаимодействия плотных потоков плазмы с образцами из меди, вольфрама, тантала, молибдена и углерода в сильном магнитном поле ГДМЛ-Т. При этом характеристики плазмы, попадающей на образцы, будут изменяться в широких пределах. Диапазон изменения температуры плазмы – от 1 до 100 эВ, плотности плазмы – от 10¹² см⁻³ до 10¹⁴ см⁻³. Выбраны соответствующие диагностики для исследования стойкости материалов плазмоприемников. В частности, в ходе экспериментов на ГОЛ-3 показано, что тройные зонды Ленгмюра могут использоваться для определения характеристик образующейся поверхностной плазмы.

Благодарности

Автор выражает благодарность за научное сотрудничество и участие в проведении экспериментов коллективу установки ГОЛ-3 под руководством А. В. Бурдакова: А. В. Аржанникову, А. В. Астрелину, В. И. Баткину, В. С. Бурмасову, Д. Е. Гавриленко, С. С. Гарифову, Г. Е. Деревянкину, В. Г. Иваненко, И. А. Иванову, М. В. Иванцовскому, К. Н. Куклину, А. Г. Макарову, М. А. Макарову, К. И. Меклеру, С. С. Попову, В. В. Поступаеву, С. В. Полосаткину, А. Ф. Ровенских, С. Л. Синицкому, В. Д. Степанову, А. В. Судникову, Ю. С. Суляеву, Ю. А. Труневу. За техническую поддержку, поддержание работоспособности установки ГОЛ-3 и помощь в изготовлении экспериментального оборудования автор благодарит Е. В. Мостипанова и А. В. Синичкина. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю А. А. Шошину за постоянную помощь, поддержку и внимание к работе.

Библиография

1. Э. А. Азизов, Об унификации подходов к выбору параметров токамаков и некоторых целях дальнейшего развития национальных термоядерных программ // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, вып. 3, с. 3—12, 2010.
2. Л. Г. Голубчиков, Материаловедческие задачи реактора ИТЭР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, вып. 2, с. 80—94, 2004.
3. P.T. Lang *et al.*, High density operation at JET by pellet refuelling // Plasma Physics and Controlled Fusion 44 1919, 2002.
4. ITER physics basis // Nuclear Fusion, Vol. 39, No. 12, 1999.
5. M. Ulrickson *et al.*, Selection of plasma facing material for ITER // SAND96-1655C.
6. J.R. Martin-Solis, R. Sanches, B. Esposito, Predictions on runaway current and energy during disruption in tokamak plasmas // Physics of Plasmas, 7, No. 8, p. 3369-3377, 2000.
7. R. Dux *et al.*, Impurity transport in internal transport barrier discharges on JET // Nuclear Fusion, 44 260, 2002.
8. ASDEX Team, The H-Mode of ASDEX // Nuclear Fusion 29 1959, 1989.
9. H. Takenaga *et al.*, Relationship between particle and heat transport in JT-60U plasmas with internal transport barrier // Nuclear Fusion, 43 1235, 2003.
10. G. Sergienko *et al.*, Erosion of tungsten limiter under high heat flux in TEXTOR // Journal of Nuclear Materials, 363-365 96-100, 2007.
11. J. P. Coad *et al.*, Erosion and deposition in the JET MK-II SRP divertor // Journal of Nuclear Materials, 363-365 287-293, 2007.
12. А. М. Жетлухин и др., Значение исследований на установке кспу для программы ИТЭР // XXXVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2010.
13. M. H. J. 't Hoen *et al.*, Saturation of deuterium retention in self-damaged tungsten exposed to high-flux plasmas // Nuclear Fusion, 52, 2, 2012.
14. Y. Uesugi *et al.*, Dynamic behavior of detached recombining plasmas during ELM-like plasma heat pulses in the divertor plasma simulator // Journal of Nuclear Materials, 290-293 1134, 2001.
15. W. Bohmeyer *et al.*, Erosion of CFC at medium flux densities in the plasma generator PSI-2 // Physica Scripta, 014016, 2009.
16. В.К. Наумов, Н. Н. Семашко, Теплогидравлические характеристики и

критические тепловые нагрузки в приёмниках пучков системы инъекции T-15 // Атомная энергия., т.72.б Вып. 6, с. 580-587, 1992.

17. *M. Merola et al.*, Overview on fabrication and joining of plasma facing and high heat flux materials for ITER // *Journal of Nuclear Materials*, v.307–311, pp.1524, 2002.

18. *В. В. Мирнов, О. А. Ткаченко*, Распределение электростатического потенциала в газодинамической ловушке // Препринт ИЯФ 86-28, Новосибирск, 1986.

19. *K. L. Wilson et al.*, Hydrogen isotope retention and release from copper // *J. Vac. Sci. Technol.*, A 5, p.2319, 1987.

20. *А. А. Шошин*, Исследование взаимодействия мощного потока электронно-горячей плазмы с мишенями на многопробочной ловушке ГОЛ-3. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Новосибирск, 2010.

21. *J-W. Ahn et al.*, KSTAR Confinement and ELM characteristics of H-mode plasmas in KSTAR // *Nuclear Fusion* 52 114001, 2012.

22. *A. S. Kukushkin et al.*, Divertor issues on ITER and extrapolation to reactors // *Fusion Eng. Des.* 65 355, 2003.

23. *R. Mitteau et al.*, Lifetime analysis of the ITER first wall under steady-state and off-normal loads // *Physica Scripta*, 2011 014081, 2011.

24. *A. Loarte et al.*, Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ITER and consequences for its operation // *Physica Scripta*, T128, p.222–228, 2007.

25. *С. В. Полосаткин и др.*, Спектроскопические исследования взаимодействия мощного плазменного потока с твердым телом на установке ГОЛ-3 // *Приборы и техника эксперимента*, № 2, с. 100-107, 2008.

26. *D. E. Gault*, Displaced mass, depth, diameter, and effects of oblique trajectories for impact craters formed in dense crystalline rocks // *The Moon*, Volume 6, Issue 1-2, pp. 32-44, 1973.

27. *S. Ratynskaia et al.*, Hypervelocity dust impacts in FTU scrape-off layer // *Nuclear Fusion* 48 015006, 2008.

28. *J. W. Bond*, On the relationships between impact crater diameters and projectile kinetic energy // *Moon and the Planets*, vol. 26, p. 317-321, 1982.

29. *В. И. Давыденко, А. А. Иванов, Г. Вайсен*. Экспериментальные методы диагностики плазмы. Часть 1 // НГУ. Новосибирск, 1999.

30. Методы исследования плазмы под ред. В. Лохте-Хольтгревена // Москва, Мир, 1971.

31. *I. Langmuir*, Scattering of Electrons in Ionized Gases // *Physical Review*, 26, 585 -

613, 1925.

32. *L. Tonks, H. M. Mott-Smith, I. Langmuir*, Flow of Ions Through a Small Orifice in a Charged Plate // *Physical Review*, 28, 104 - 128, 1926.

33. *H. M. Mott-Smith and I. Langmuir*, The Theory of Collectors in Gaseous Discharges // *Physical Review*, 28, 727 – 763, 1926.

34. *D. Bohm and E. P. Gross*, Effects of Plasma Boundaries in Plasma Oscillations // *Physical Review*, 79, 992, 1950.

35. *Б.Б.Кадомцев*. Коллективные явления в плазме // Москва, Наука, 1988.