



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

**Институт**  
**Кафедра**

**ИТАЭ**  
**ОФиЯС**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
**(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

**Направление** 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика  
(код и наименование)

**Образовательная программа** Термоядерные реакторы и плазменные установки

**Форма обучения** очная  
(очная/очно-заочная/заочная)

**Тема:** Исследование взаимодействия турбулентной плазмы с поверхностью типа «пух» в установке ПЛМ-М

**Студент** ТФ-13-18 Анисимов Д.А.  
группа подпись фамилия и инициалы

**Руководитель ВКР** д.ф.-м.н. профессор Будаев В.П.  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Консультант**  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Внешний консультант**  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

организация  
**«Работа допущена к защите»**

член-корреспондент Российской Академии Наук  
**Заведующий кафедрой** д.т.н. Дедов А.В.  
уч. степень звание подпись фамилия и инициалы

**Дата**

**Москва, 2022**



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

**Институт**  
**Кафедра**

**ИТАЭ**  
**ОФиЯС**

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**(БАКАЛАВРСКУЮ РАБОТУ)**

**Направление** 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика  
(код и наименование)

**Образовательная программа** Термоядерные реакторы и плазменные установки

**Форма обучения** очная  
(очная/очно-заочная/заочная)

**Тема:** Исследование взаимодействия турбулентной плазмы с поверхностью типа «пух» в установке ПЛМ-М

**Студент** ТФ-13-18 Анисимов Д.А.  
группа подпись фамилия и инициалы

**Руководитель ВКР** д.ф.-м.н. профессор Будаев В.П.  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Консультант**  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Внешний консультант**  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

**Заведующий кафедрой** д.т.н. член-корреспондент Российской Академии Наук Дедов А.В.  
уч. степень звание подпись фамилия и инициалы

**Место выполнения работы** ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

## СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ЗАДАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

### Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Наноструктурированная поверхность типа «пух», теоретическое описание роста «пуха» на тугоплавких материалах

1.2 Электронная эмиссия с поверхности с наноструктурой типа «пух»

1.3 Свойства турбулентной плазмы в линейных плазменных установках и токамаках

Выводы главы 1

### Глава 2. УСТАНОВКА ПЛМ-М

2.1 Описание установки ПЛМ-М

2.2 Описание зондовой диагностики в ПЛМ-М

Выводы главы 2

### Глава 3. ИЗМЕРЕНИЯ ЗОНДАМИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ФОРМИРОВАНИЮ СТРУКТУР ТИПА «ПУХ» НА ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛАХ

3.1 Эксперименты в установке ПЛМ-М с металлическими образцами для формирования наноструктуры типа «пух»

3.2 Параметры турбулентной плазмы в установке ПЛМ-М

Выводы главы 3

### Глава 4. РАСЧЁТ ПОТЕНЦИАЛА НАД СТРУКТУРОЙ ТИПА «ПУХ»

Выводы главы 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## ПЕРЕЧЕНЬ ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Количество листов \_\_\_\_\_

Количество слайдов в презентации \_\_\_\_\_

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменная установка НИУ «МЭИ» для испытаний тугоплавких металлов и создания высокопористых материалов нового поколения

/ В.П. Будаев, С.Д. Федорович, М.В. Лукашевский, Ю.В. Мартыненко // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2017. – Т. 40. – № 3. – С. 23-36.

2. Будаев, В. П. Наблюдения перемежаемости и обобщённого самоподобия в турбулентных пограничных слоях лабораторной и магнитосферной плазмы: на пути к определению количественных характеристик переноса / В. П. Будаев, С. П. Савин, Л. М. Зелёный // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181. – № 9. – С. 905-952.

### Примечания:

1. Задание брошюруется вместе с выпускной работой после титульного листа (страницы задания имеют номера 2, 3).
2. Отзыв руководителя, рецензия(и), отчет о проверке на объем заимствований и согласие студента на размещение работы в открытом доступе вкладываются в конверт (файловую папку) под обложкой работы.

## **АННОТАЦИЯ**

Работа содержит 53 страницы, 26 рисунков, 5 таблиц, 13 библиографических названий.

Основная цель дипломной работы состоит в исследовании взаимодействия турбулентной плазмы с наноструктурированной поверхностью. В данной работе выполнен анализ спектральных и статистических характеристик плазмы и расчёт потенциала над структурой типа «пух» для анализа их взаимодействия в установке ПЛМ-М.

ОГЛАВЛЕНИЕ	
ВВЕДЕНИЕ .....	6
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ .....	7
1.1 НАНОСТРУКТУРИРОВАННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ТИПА «ПУХ».....	7
1.2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РОСТА «ПУХА» НА ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛАХ .....	10
1.3 ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ .....	14
1.4 СВОЙСТВА ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ В ЛИНЕЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВКАХ И ТОКАМАКАХ .....	18
ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 1 .....	22
ГЛАВА 2. УСТАНОВКА ПЛМ-М .....	24
2.1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ПЛМ-М .....	24
2.2 ОПИСАНИЕ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ В ПЛМ-М .....	26
ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 2.....	29
ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЯ ЗОНДАМИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ФОРМИРОВАНИЮ СТРУКТУР ТИПА «ПУХ» НА ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛАХ.....	30
3.1 ЭКСПЕРИМЕНТЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ОБРАЗЦАМИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ ТИПА «ПУХ»...	30
3.2 ПАРАМЕТРЫ ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М.....	33
ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 3.....	44
ГЛАВА 4. РАСЧЁТ ПОТЕНЦИАЛА НАД СТРУКТУРОЙ ТИПА «ПУХ».....	45
ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 4.....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	51
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	52

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из важнейших проблем плазменного удержания является проблема взаимодействия плазмы с материалами. В нынешних установках по типу токамака или стелларатора огромное количество тепловой энергии передается на стенки, в следствие которых возможны различные деформации. В токамаке ИТЭР основным защитным элементом, контактирующим с плазмой, будет дивертор, изготовленный из вольфрама. Он будет непрерывно подвергаться различным нагрузкам, в том числе плазменным потокам гелия, который в большом количестве образуется в результате реакции синтеза трития и дейтерия. Под нагрузками материалы могут значительно изменять свои свойства в следствии взаимодействия с плазмой. Поэтому необходимы экспериментальные испытания материалов термоядерных установок с целью оценить последствия.

Длительность разряда в экспериментах на современных токамаках значительно меньше длительности стационарного разряда в термоядерном реакторе, в том числе в ИТЭР. Поэтому требуются испытания термоядерных материалов в стационарных плазменных разрядах. В России проводятся испытания и изготовление термоядерных материалов и модулей вольфрамового дивертора ИТЭР.

С этой целью для испытаний вольфрама стационарными плазменными нагрузками мощностью  $1 \sim 5 \text{ МВт/м}^2$ , имитирующими стационарную умеренную нагрузку на пластины дивертора ИТЭР, и была сооружена установка ПЛМ – плазменный линейный мультикасп, а затем и ее усовершенствованная версия ПЛМ-М. Эти установки позволят провести испытания материалов и исследование взаимодействия плазма-стенка в стационарных многочасовых разрядах в интересах ИТЭР и термоядерных установок следующего поколения, планируемых к сооружению, – ТИН и ДЕМО.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### 1.1 НАНОСТРУКТУРИРОВАННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ТИПА «ПУХ»

Одним из важных направлений в исследовании взаимодействия плазма-стенка является получение наноструктурированной поверхности типа «пух» [1] на вольфраме. В условиях термоядерных установок рост наноструктур может оказать влияние на условия взаимодействия плазма-стенка, которые могут приводить к плавлению и разрушению защитной поверхности камеры плазменной установки. Наноструктурированный слой может полностью изменить взаимодействие плазмы с материалом, приводить к защите вольфрама от образования трещин, что может повысить время эксплуатации термоядерного реактора.

Характерный размер наноструктурированного слоя на поверхности металла составляет порядка 1 мкм и меньше, однако экспериментальные результаты по исследованию ускоренного роста «пуха» [1] показывают увеличение толщины слоя «пуха» до 1 мм. На данный момент не существует теории, позволяющей в полном объеме описать процесс роста пуха при плазменном облучении. В начале рассмотрим экспериментальные методы получения «пуха» на плазменных установках. Впервые, наноструктурированная поверхность типа «пух» была получена японскими учеными на установке *NAGDIS-II* [2], которая является линейной стационарной плазменной установкой с магнитным полем. Стандартные параметры плазмы в опытах: плотность потока плазмы  $n_e = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и температуры электронов  $T_e = 8,5 \text{ эВ}$ . Экспериментально были определены необходимые условия роста «пуха» при стационарном облучении плазмой. Вольфрамовый «пух» (рисунок 1.1а) образовывался в гелиевом плазменном разряде, когда температура поверхности образца находилась в районе 1250 К при энергии падающих ионов гелия 12 эВ, при флюенсе ионов гелия в пределах  $10^{26}$ - $10^{27}$  ионов/м<sup>2</sup>. При получении «пуха» испытуемый образец помещался нормально к плазменному потоку и через специальный ввод подключался к источнику напряжения, который подавал отрицательный потенциал на образец для увеличения энергии ионов гелия и уменьшения потока электронов. Измерение температуры образца производилось

пирометрическими методами, а параметры плазмы измерялись с помощью спектроскопических и зондовых диагностик.

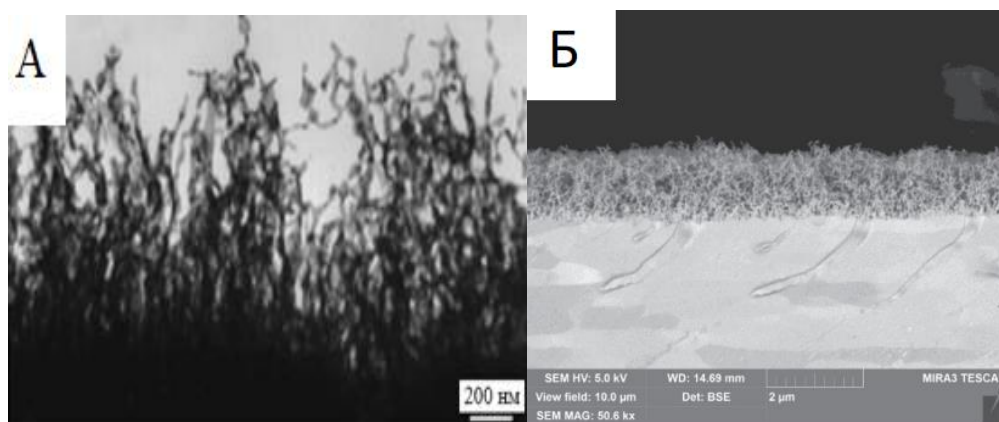


Рисунок 1.1 Вольфрамовый «пух», полученный на установке  
а) *NAGDIS-II*; б) ПЛМ

Такой метод получения «пуха» реализован и хорошо отработан на плазменной установке ПЛМ в НИУ «МЭИ» [3]. На установке ПЛМ были получены образцы вольфрамового «пуха» толщиной порядка одного мкм с различной степенью наноструктурирования поверхности (рисунок 1.1б).

В работе [4] рассматривалось влияние гелиевой плазмы с энергией ионов 11,4; 9,2 и 3,2 эВ при температуре вольфрамовой мишени  $T_s = 1200$  К, времени облучения 3500 с, флюенс ионов гелия более  $10^{25}$  ионов/м<sup>2</sup>. Толщина наноструктурированной поверхности образца при энергии ионов 11,4 эВ (рисунок 1.2а) составляла 5-7 мкм, а общая структуры поверхности состояла из наноразмерных мембран, но не нановолокон. При энергии ионов 9,2 эВ (рисунок 1.2б) толщина поверхности составляла также 5 мкм, но наноструктура была измененной, на ней наблюдались микроструктурные образования, но внутри них нельзя выделить отдельные нановолокна или мембраны. При энергии ионов 3,2 эВ (рисунок 1.2в) наблюдалась почти гладкая поверхности с небольшими микроструктурными неоднородностями высотой до 1 мкм.



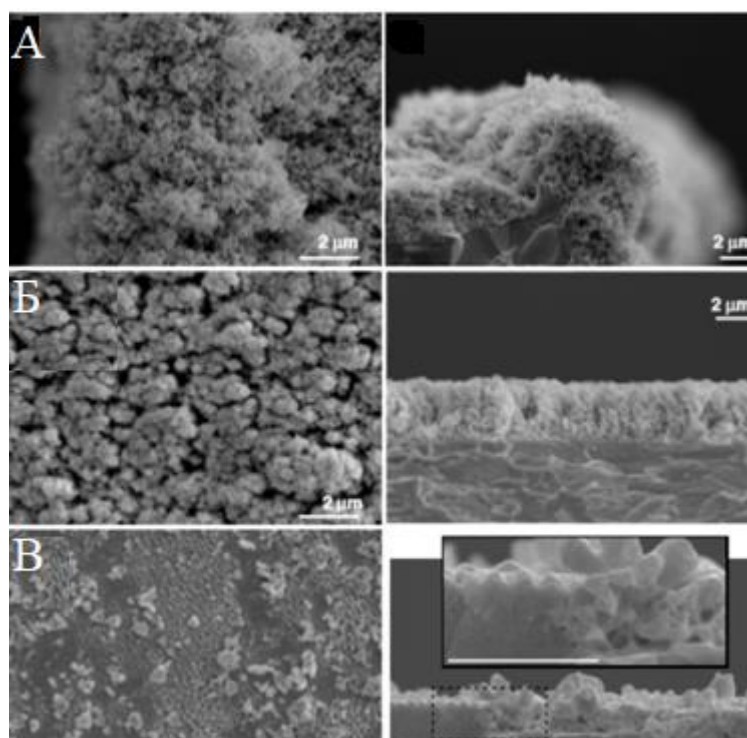


Рисунок 1.2 Микрофотография вольфрамовый образца после облучения гелиевой плазмы с энергией ионов, приходящих на поверхность

а) 11,4 эВ; б) 9,2 эВ; в) 3,2 эВ

В работе [5] приведены результаты исследования наноструктурированного «пуха» в установке ПЛМ, облученного электронным лазерным пучком в качестве дополнительной тепловой нагрузки на материал.

СЭМ-микрофотографии наноструктурированного «пуха» после испытания приведены на рисунке 1.3.

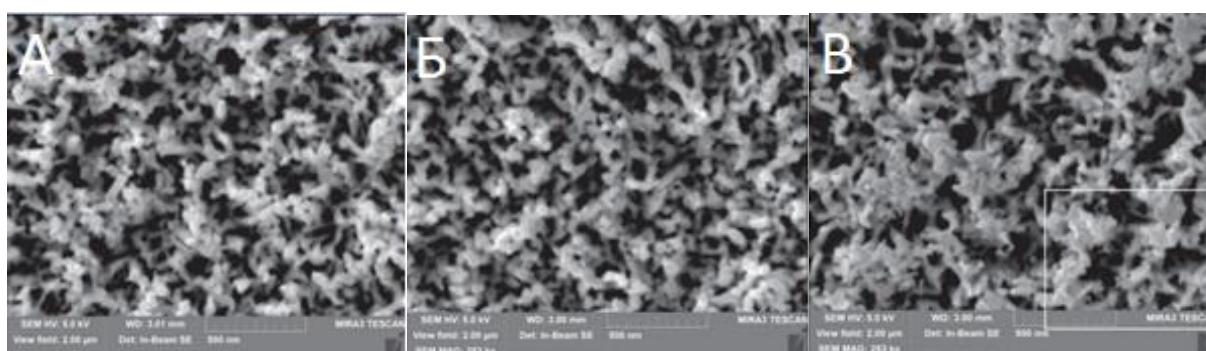


Рисунок 1.3 Вольфрамовый «пух» подвергнутый

а) 4 МВт/м<sup>2</sup>, длительность 4,6 миллисекунд; б) 20,1 МВт/м<sup>2</sup>, длительность 9,3 миллисекунд; в) 49 МВт/м<sup>2</sup>, длительность 40 миллисекунд

Дальнейший анализ образцов показал, что повреждения «пуха» после нагрузки 4 и 20,1 МВт/м<sup>2</sup> не наблюдалось (рисунки 1.3а,б). Только нагрузка 49 МВт/м<sup>2</sup> привела к небольшому оплавлению краев пуховых волокон (рисунок 1.3в). Полученные результаты говорят о том, что следует учитывать устойчивость «пуха» под действием локальной тепловой нагрузки, так как выброс вольфрамовой пыли приводит к ухудшению производительности токамака.

Таким образом, столь быстрый и разнообразный рост вольфрамовой наноструктуры позволяет рассматривать модифицированные образцы в технологических и коммерческих применениях.

## 1.2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РОСТА «ПУХА» НА ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛАХ

В соответствии с описанными ранее теоретическими идеями роста пуха [6] рассматривается, что структура пуха на вольфраме образуется в результате роста из адатомов, появляющихся на поверхности в результате бомбардировки ионами  $He^+$ . Образование адатома на поверхности материала происходит в результате выбивания атома из поверхностного слоя, для чего требуется энергия  $E_a \approx \frac{E_s}{3}$ , где  $E_s$  – энергия сублимации, определяющая порог распыления  $E_t$ . Поэтому порог образования адатомов на поверхности составляет  $\sim \frac{E_t}{3}$  и определяет энергетический порог ионов  $He$  для образования пуха. После момента образования структуры пуха, она начинает экранировать исходную подложку, что в итоге приводит к тому, что ионы гелия создают адатомы непосредственно на волокнах на поверхности (волосках структуры типа «пух»).

Скорость образования адатомов при облучении ионами  $He^+$  равна

$$q = j \cdot Y_a, \quad (1)$$

где  $j$  – плотность тока ионов,

$Y_a$  – коэффициент образования адатомов.

Если концентрация адатомов на поверхности определяется скоростью рекомбинации с ямами, то она равна

$$C = \left(\frac{q}{D}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии адатомов по поверхности.

Адаомы могут присоединяться к ступенькам, выступам на поверхности и, объединяясь, образовывать кластеры, являющиеся зародышами нановолокон (волосков). Напомним, что началу образования пуха предшествует появление ям, которые могут быть сформированы от разорванных пузырьков геля. Края разорванных оболочек пузырьков как раз являются ловушками для мигрирующих по поверхности адатомов, которые, оседая на них, дают начало росту волокон (волосков).

Другим наиболее вероятным местом образования кластеров–зародышей волокон (волосков) являются тонкие оболочки не вскрывшихся пузырьков. Это происходит вследствие кривизны вздувшегося пузырька. А на искривлённой поверхности большая концентрация ступенек–ловушек для адатомов.

Таким образом, образование кластеров – зародышей волокон(волосков) из адатомов наиболее вероятны у края разорванного пузырька и над пузырьками геля с большим давлением. Адаомы диффундируют по волоску и встраиваются в его структуру на вершине волоска, поскольку на вершине больше кривизна и больше ловушек для адатомов. При этом скорость роста волоска определяется потоком адатомов на вершину волоска

$$\frac{dh}{dt} = \left(\frac{D\partial C}{\partial x}\right)_{x=h} \cdot \frac{2\pi R}{\pi R^2 N}, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус волоска,

$N$  – число атомов в единице объема волоска.

Градиент концентрации адатомов на волоске равен

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{(C_0 - C_h)}{h} \approx \frac{C_0}{l}, \quad (4)$$

где  $C_0 = \left(\frac{q}{D}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{\left(\frac{\Delta\mu}{T}\right)}$  - концентрация адатом у основания волоска,

$C_h$  – концентрация адатом у вершины волоска.

Совместно решая приведённые выше уравнения, получим

$$h = (2 \cdot D_{eff} \cdot t)^2, \quad (5)$$

$$D_{eff} = \frac{(q \cdot D)^{\frac{1}{2}}}{RN}. \quad (6)$$

Предложенная модель дает такую же зависимость длины волоска от времени экспозиции в плазме, как наблюдалась экспериментально в работе [2] для толщины слоя структуры типа «пух». При этом эффективная энергия активации диффузии для  $D_{eff}$  и предэкспоненциальный множитель для роста «пуха» на вольфраме совпадают с значениями полученными в экспериментах [2].

Температурный интервал, в котором наблюдается образование «пуха» в данной модели вполне объясним. При  $T < \sim \frac{T_m}{4}$  ( $T_m$  – температура плавления) концентрация адатомов столь высока, что расстояние между ними  $\sim 3N^{-\frac{1}{3}}$ , и их перенос по поверхности не возможен, а при  $T > \sim \frac{T_m}{2}$  кластеры из адатомов не образуются вследствие термического распада кластеров.

Важнейшей характеристикой структуры является удельная поверхность  $SSA$  (*Specific Surface Area*), которая определяет адсорбционную и химическую активность поверхности.  $SSA$  - отношение полной поверхности материала к единице массы  $\left[\frac{m^2}{kg}\right]$  или к объёму его материальной части  $[m^{-1}]$ .

Для наноструктуры состоящей из цилиндрических волосков радиусом  $R$  и высотой  $h \gg R$

$$SSA = \frac{2\pi R h}{\pi R^2 h} = \frac{2}{R}. \quad (7)$$

Для наноструктуры, состоящей из сферических элементов с радиусом  $R$

$$SSA = \frac{3}{R}. \quad (8)$$

Другой важной характеристикой пористой структуры является коэффициент пористости  $k$ , равный доле пор в материале. Для наноструктуры состоящей из цилиндрических волосков радиусом  $R$  и высотой  $h$

$$k = 1 - \pi R^2 h \left( \frac{n}{h} \right) = 1 - \pi R^2 n, \quad (9)$$

где  $n [\text{м}^{-2}]$  – поверхностная плотность нановолокон (волосков),

$\left( \frac{n}{h} \right)$  – объёмная плотность таких волосков.

Следует, однако, заметить, что при уменьшении  $n$  поверхность становится гладкой с редкими одиночными волосками. В реальности волоски будут расти достаточно плотно вдоль краёв разорванных блистеров, но их поверхностная плотность будет мала. Поэтому для сохранения свойств пористой структуры  $n$  не должно быть меньше  $n \approx h^{-2}$ . Так что реально достижимая пористость равна

$$k_{max} = 1 - \left( \frac{R}{h} \right)^2. \quad (10)$$

Как видно  $SSA$  зависит от толщины волосков, и не зависит от длины волосков и их плотности. Коэффициент пористости при  $n > h^{-2}$  зависит только от толщины волосков и их плотности, но его максимальное значение зависит от длины волосков  $h$ .

Длина волосков важный параметр, определяющий толщину наноструктурного слоя и его прочность.

На более поздних стадиях роста волосков они начинают ветвиться. При этом толщина ветвей остаётся такой же, как толщина исходного волоска. В этом случае  $SSA$  и  $k$  выражаются теми же формулами (7) и (9). Но объём одного куста равен  $\pi R^2 \Sigma h$ , а объёмная плотность волосков равна  $\frac{n}{\Sigma h}$ , где  $\Sigma h$  – длина всех волосков куста, включая ветви.

Таким образом, для увеличения  $SSA$  необходимо уменьшать толщину волосков, а для увеличения пористости следует увеличивать их плотность.

### 1.3 ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Электронная эмиссия – это явление испускания электрона с поверхности металла или жидкости. Поверхность, с которой испускаются электроны называется эмиттером или катодом, а поверхность, которая принимает электроны называется анодом. Для осуществления эмиссионного процесса необходимо сообщить электрону энергию, называемой работой выхода, которая для проводников определяется разностью между полной энергией потенциального барьера и энергией уровня Ферми. Различают такие виды электронной эмиссии, как термоэлектронная, автоэлектронная, фотоэлектронная, вторичная и другие.

Для движения электронов от катода к аноду между ними прикладывается напряжение. В итоге между током эмиссии и анодным напряжением существует взаимосвязь, которая называется вольтамперной характеристикой.

В случае пространственного заряда зависимость эмиссионного тока и анодного напряжения описывается законом Чайлда-Ленгмюра:

$$I = PV^{\frac{3}{2}}, \quad (11)$$

где  $P$  – называется первеансом диода и равна  $P = \frac{4}{9} \frac{A\varepsilon}{d^2} 4\eta^{\frac{1}{2}}$ ,

$A$  – площадь катода,

$d$  – межэлектродное расстояние,

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость,

$\eta$  – отношение массы электрона к заряду.

Когда температура поверхности растет, то число электронов с кинетической энергией превышающей работу выхода увеличивается. Электронная эмиссия, вызванная нагреванием поверхности, называется термоэлектронной. Зависимость, которая описывает изменение эмиссионного тока от температуры называется уравнением Ричардса-Дэшмана:

$$j = A_0 D T^2 e^{-e\varphi/kT}, \quad (12)$$

где  $A_0 = \frac{4\pi e m k^2}{h^3}$  – постоянная Зоммерфельда,

$D$  – средний коэффициент прозрачности потенциального барьера для электронов с кинетической энергией достаточной для его преодоления,

$j$  – плотность термоэмиссионного тока,

$\varphi$  – работа выхода электронов из металла,

$T$  – температура проводника,

$k$  – постоянная Больцмана.

При сильном влиянии внешнего электрического поля вблизи поверхности катода, силовые линии которого направлены к эмитирующей поверхности, происходит уменьшение высоты потенциального барьера на границе металл-вакуум. Такое явление получило название эффекта Шоттки. С его учетом уравнение Ричардса-Дэшмана преобразуется к виду:

$$j = A_0 D T^{\frac{1}{2}} e^{-e\varphi - \sqrt[3]{e^3 E}} / kT, \quad (13)$$

где  $E$  – напряженность внешнего электрического поля.

Внешнее электрическое поле влияет не только на высоту потенциального барьера, но и на его ширину на границу металл-вакуум. Из этого следует вывод о том, что при определенном значении напряженности электрического поля длина волны Де Бройля для электрона станет равной ширине потенциального барьера и электрон туннелирует через барьер без подвода ему дополнительной энергии. Сужение потенциального барьера и туннелирование электронов приводит к резкому повышению тока. Данный вид электронной эмиссии получил название автоэлектронной, а зависимость тока автоэлектронной эмиссии и напряженности внешнего электрического поля описывается уравнением Фаулера-Нордгейма:

$$j_a = A_a E^2 e^{-B\phi/E}, \quad (14)$$

$A_a$  и  $B$  – эмиссионные постоянные,

$E$  – напряженность внешнего электрического поля.

Описание других типов электронной эмиссии приведено в специальной литературе [8].

Для работы эмиттера на основе автоэлектронной эмиссии необходимо создать локальное электрическое поле порядка  $10^7$  В/м, при этом величина тока эмиссии может составлять несколько нА/см<sup>2</sup>. Для увеличения тока эмиссии из уравнения Фаулера-Нордгейма необходимо повышать локальную напряженность электрического поля у поверхности автокатода, такая задача решается благодаря созданию эмиссионных поверхностей особой формы, на которых происходит значительное искривление эквипотенциальных линий и как следствие высокий градиент напряженности электрического поля. Характеристика увеличения напряженности электрического поля на неоднородности называется коэффициентом усиления электрического поля и рассчитывается по формуле:

$$\beta = E_{av}/E_{loc}, \quad (15)$$



где  $E_{av}$  – средняя напряженность электрического поля в диодном промежутке,

$E_{loc}$  – напряженность поля вблизи поверхности автокатода.

Автоэлектронная эмиссия с наноструктурированной поверхности вольфрама рассматривается как основной вид эмиссии.

Работы по исследованию эмиссионных свойств модифицированных образцов вольфрама, тантала и молибдена (рисунок 1.3) проводятся на плазменной установке *NAGDIS-II* [10], параметры облучения представлены в таблице 1.1.

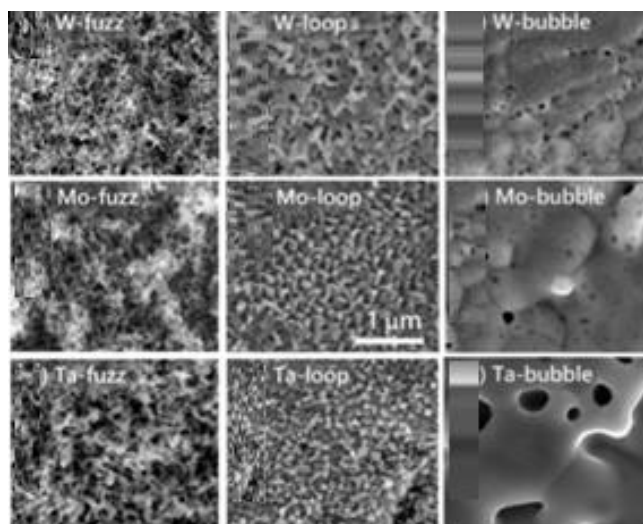


Рисунок 1.3 Изображение наноструктурированной поверхности *W*, *Mo*, *Ta*, и характерные параметры облучения этих образцов.

Таблица 1.1 – параметры облучения образцов в установке *NAGDIS-II* и их коэффициент усиления электрического поля, полученный из ВАХ

Металл	тип наноструктуры	Энергия облучаемых ионов, [эВ]	Ионный флюенс, [м <sup>-2</sup> ]	Температура поверхности, [K]	Коэффициент усиления эл. поля
<i>W</i>	<i>fuzz</i>	50	$5 \times 10^{25}$	1550	1040
	<i>loop</i>	50	$1 \times 10^{25}$	1550	140
	<i>bubble</i>	18	$4,9 \times 10^{24}$	1410	480
<i>Mo</i>	<i>fuzz</i>	50	$2,3 \times 10^{25}$	1030	540

	<i>loop</i>	50	$9,9 \times 10^{24}$	1040	190
	<i>bubble</i>	30	$5,9 \times 10^{24}$	1270	400
<i>Ta</i>	<i>fuzz</i>	78	$2,6 \times 10^{26}$	1000	1060
	<i>loop</i>	65	$1,3 \times 10^{26}$	1030	320
	<i>bubble</i>	46	$8,4 \times 10^{25}$	1090	780

Исследование эмиссионных свойств проводились в высоком вакууме в плоскопараллельной конфигурации диодного промежутка при расстоянии 0.2 – 2 мм прикладываемое напряжение составляло не более 12 кВ. После анализа ВАХ были получены значения коэффициента усиления электрического, для расчета в качестве работы выхода использовались значения величин для чистых металлических поверхностей.

Полученные результаты говорят о том, что наименьший коэффициент усиления электрического поля получился у поверхности молибдена. Такие экспериментальные результаты хорошо согласуется с расчетом, выполненным для одного эмиссионного центра, т.к. нановолокно из молибдена имеет наименьший диаметр.

#### **1.4 СВОЙСТВА ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ В ЛИНЕЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВКАХ И ТОКАМАКАХ**

Турбулентность в плазме формируется разными классами неустойчивостей - дрейфово-диссипативными, кинетическими, магнитогидродинамическими (МГД) и другими. В плазменных экспериментах важная роль граничных эффектов принимается во внимание всегда, когда ставится задача достичь наилучших условий удержания плазмы в ловушке и нагрева плазмы. Особенно это относится к экспериментам в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы: токамаках, стеллараторах, линейных установках. Многочисленные исследования в таких установках свидетельствуют о сильной развитой турбулентности плазмы в центральных и периферийных областях объёма удержания. Турбулентность

приводит к повышенному переносу плазмы поперёк удерживающего её магнитного поля, снижая эффективность удержания и увеличивая тепловую нагрузку на элементы вакуумной камеры, контактирующие с горячей плазмой.

В турбулентной плазме лабораторных термоядерных установок и магнитосфере перемежаемость наблюдается в виде пульсаций большой амплитуды. Законы масштабного подобия (скейлинги) такой турбулентности с перемежаемостью описываются параметрами, зависящими от масштаба. Из теоретического рассмотрения следует, что свойство перемежаемости турбулентности связано со скрытыми статистическими симметриями (симметриями масштабной инвариантности) динамических уравнений, описывающих движение, и необходимостью установить масштабную инвариантность в ограниченном пространстве пристеночной зоны.

Случайные пульсации скорости и других параметров турбулентного потока с перемежаемостью обладают негауссовой статистикой, т.е. не описываются классическим (нормальным) законом дисперсии. Из самых общих теоретических представлений следует, что динамика такого процесса может описываться степенными законами распределения, т.е. спектром характерных масштабов. Дальние корреляции, формируемые свойством многомасштабной инвариантности и негауссовой статистикой, вызывают повышенный турбулентный перенос.

Низкочастотная турбулентность пристеночной плазмы измерялась во многих токамаках, начиная с экспериментов на первом токамаке ТМП в Курчатовском институте. С конца 1970-х гг. прилагаются значительные усилия для измерения параметров турбулентности пристеночной плазмы в термоядерных установках (ТУ) для выяснения механизмов переноса плазмы поперёк магнитного поля, которые аномально велики вблизи стенки. Пристеночная плазма в ТУ очень сложный объект для исследований. Один из наиболее информативных методов её изучения является зондовый метод. Применяются миниатюрные зонды из теплостойких материалов (обычно из вольфрама или графита), погружаемые в

плазму. Используются также оптические методы диагностики (измерение спектральных линий основной и примесной компонент плазмы), болометры, собирающие зонды, термопарные зонды, рефлектометрия, магнитные зонды, регистрация оптического излучения быстрыми цифровыми видеокамерами. Применение таких методов диагностики обосновывается для разных установок, с учетом соответствующих условий, таких как размер установки и диагностических патрубков, временной и пространственный масштаб изменения параметров плазмы.

Временное изменение параметров пристеночной плазмы имеет характерную структуру с наличием аperiодических всплесков (пульсаций) амплитуды (рисунок 1.4).

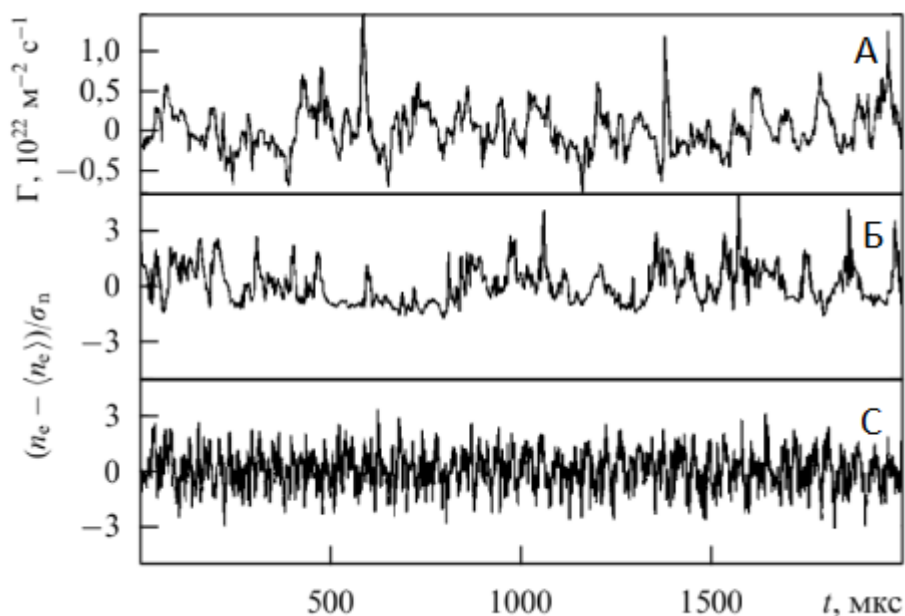


Рисунок 1.4 Сигналы флуктуирующих параметров пристеночной плазмы в токамаке Т-10: А) поперечного потока частиц  $\Gamma$  в СОЛ на радиусе  $r = 36$  см, плотности плазмы  $n_e$ ; Б) на радиусе  $r = 32$  см; В)  $r = 29$  см

Такие пульсации наблюдаются для флуктуаций плотности, электрических полей, поперечных потоков плазмы, связанных с  $[E \times B]$ -дрейфом. Такое свойство низкочастотной турбулентности называется перемежаемостью (англ. *intermittency*) и наблюдается многими исследователями во всех лабораторных установках с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы - токамаках, стеллараторах,

линейных установках, пинчах с обращённым магнитным полем. Турбулентные флуктуации пристеночной плазмы содержат всплески амплитуд характерной формы с резким нарастанием и затяжным уменьшением амплитуды (рисунок 1.5) на масштабе времён порядка 50 - 200 мкс.

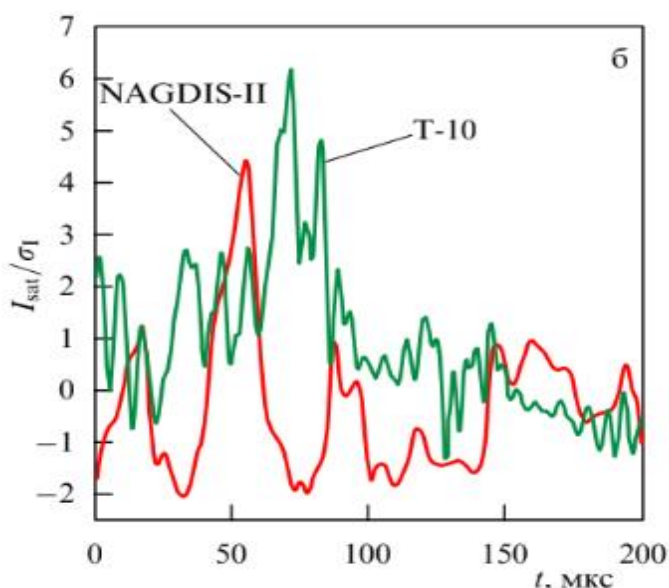


Рисунок 1.5 Пики большой амплитуды флуктуаций ионного тока насыщения в пристеночной плазме токамака T-10 и *NAGDIS-II*.

Такие характерные времена наблюдались в пристеночной плазме термоядерных установок разного масштаба и с различной магнитной топологией магнитной ловушки: токамаках, стеллараторах, линейных установках. Такие структуры в литературе называют когерентными структурами. Время, которое сигнал проводит в таких когерентных структурах, составляет от  $\sim 1\%$  до  $\sim 15\%$  от общей длительности сигнала.

Дальний порядок корреляций, вызванный масштабной инвариантностью турбулентности, можно выявить, применяя соответствующие методы анализа. Вейвлет-преобразование иллюстрирует наличие когерентных структур в исследуемом сигнале, их иерархию. Типичное вейвлет-преобразование для турбулентного сигнала плотности в токамаке T-10 представлено на рисунке 1.6. Иерархия структур, наблюдаемая на рисунке 1.6, свидетельствует о каскадном

процессе и самоподобии. Наблюдается ветвление, древообразная форма, что свидетельствует о фрактальных свойствах процесса.

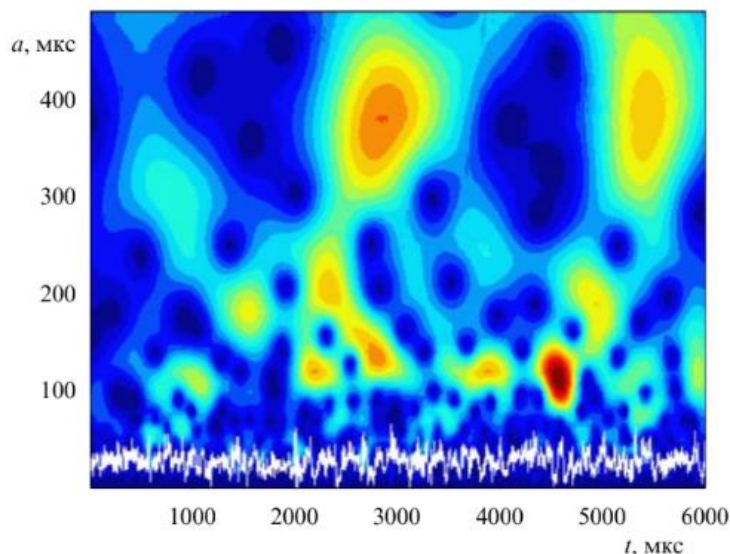


Рисунок 1.6 Вейвлет преобразование сигнала плотности пристеночной плазмы токамака Т-10

Аналитически или численно решить задачу о динамике турбулентной плазмы и определить скейлинги турбулентности с требуемой точностью на больших временных масштабах (например, времени работы токамака-реактора) в настоящее время не удаётся. Следовательно, необходимо из эксперимента определить статистические свойства турбулентности и получить оценки, что в дальнейшем позволит развить представления о физических свойствах турбулентности плазмы и даст возможность качественно и количественно описать процессы переноса в лабораторной плазме.

## ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 1

В разделе 1.1 приводится описание наноструктурированной поверхности, которая образуется на металлических материалах в процессе плазменного облучения. Рассмотрены экспериментальные методы получения наноструктурированной поверхности типа «пух» на вольфраме в установке

*NAGDIS-II*. Для этой установки приведены типичные параметры плазменного облучения при модификации поверхности тугоплавких материалов.

В разделе 1.2 приведено теоретическое описание процесса роста нанопуха на основе диффузионной модели движения адатомов на исследуемой поверхности.

В разделе 1.3 приведено описание фундаментальных законов, описывающих процесс электронной эмиссии с эмиттеров различной геометрии. Изложенные в данном разделе методики будут использованы для исследования эмиссионных свойств и анализа полученных экспериментальных данных в главе 4.

В разделе 1.4 приведено описание турбулентности, возникающей в плазменных установках. Изложенное в данном разделе теоретическое описание будет использовано для анализа полученных экспериментальных данных в главе 3.

## ГЛАВА 2. УСТАНОВКА ПЛМ-М

### 2.1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ПЛМ-М

Плазменная установка ПЛМ-М (рисунок 2.1) - мультикасповая линейная ловушка со стационарным плазменным разрядом для плазменных испытаний материалов термоядерного реактора.



Рисунок 2.1 Плазменная установка ПЛМ-М

Установка ПЛМ-М сооружена на базе имеющейся установки ПЛМ (НИУ «МЭИ»). Параметры, которые получены на усовершенствованной установке приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры, достигнутые в усовершенствованной установке ПЛМ-М

Параметр	
Диаметр камеры/плазменного пучка, см	16/3,5
Магнитное поле на оси, Тл	0,02
Магнитное поле в каспах, Тл	до 0,2
Концентрация электронов плазмы, $\text{м}^{-3}$	$5 \cdot 10^{18}$
Температура электронов плазмы, эВ	1-10
Ионный поток на испытуемый макет, $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	$10^{23}$ - $10^{25}$
Нагрузка плазменно-тепловая на испытуемый макет МВт/м <sup>2</sup>	4,5
Стационарный плазменный разряд более 300 мин	
Рабочий газ – гелий	



Магнитная система в установке ПЛМ-М состоит из катушки соленоида, создающей продольное магнитное поле, и восьмиполусной системы (октуполь) из постоянных магнитов, создающих мультикасповую конфигурацию, окружающих соленоид. Высоковакуумная охлаждаемая разрядная камера ПЛМ-М оснащена безмасляными вакуумными насосами для достижения давления менее  $1 \cdot 10^{-6}$  Торр. Для моделирования нагрузок уровня ЭЛМов в крупном токамаке реакторного размера сооружен стенд на основе мощного лазерного комплекса с импульсным лазером *Nd:YAG* модель *LQ529A* с длиной волны излучения 1064 нм и энергией импульса 500 мДж. Такой стенд используется для генерации дуг и исследования дуговой эрозии в плазменных экспериментах на ПЛМ-М.

Сооружается секция для ИЦР нагрева плазмы на частоте 27 МГц с использованием геликоновой антенны. Проводятся испытания охлаждаемых вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора термоядерного реактора по технологии, разработанной для ИТЭР. Разрабатываются методы интенсивного охлаждения (двухфазным парогазовым, жидкометаллическим охлаждением) модулей теплозащитной облицовки дивертора и первой стенки термоядерного реактора при стационарной эксплуатации. Планируются эксперименты с достижением режима «*detached*», аналог закрытого дивертора реактора-токамака, испытание жидкометаллических компонентов стенки/лимитеры из лития, олова и других, технологии управления и турбулентного нагрева плазмы электродами под напряжением.

Установка ПЛМ-М не имеет аналогов в России, планируется довести параметры до проектных, аналогичных самой мощной установке в мире *MAGNUM-PSI* (Евросоюз).

## 2.2 ОПИСАНИЕ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ В ПЛМ-М

Электрические зонды являются одним из основных методов диагностики плазмы, разработанные Ирвином Ленгмюром в 1923 году. С помощью зондовой диагностики определяются основные параметры плазмы: электронная концентрация –  $n$ , температура –  $T$  и другие.

Поскольку электроды зонда находятся в непосредственном контакте с плазмой, то длительность контакта сводится к минимуму. При монтаже зонда используются скоростные пневматические манипуляторы, с помощью которых возможно быстрое перемещение зонда (0,1 секунд) в плазму и из неё. Перегрев зонда может вызвать высвобождение различных примесей в плазму и ее охлаждение. Сильное повышение температуры может привести к повреждению или даже полному разрушению зонда. Зонд соединяется с камерой с помощью вакуумного клапана, что даёт возможность ремонтировать или заменять часть зонда, или весь манипулятор, не нарушая вакуум. Состояние электродов зонда, контактирующих с плазмой, можно проверить визуально через вакуумное окно после каждого разряда.

С учётом наработанной базы данных по зондовым измерениям для установки ПЛМ разработан измерительный узел на основе зонда Ленгмюра с погружным манипулятором (рисунок 2.2).

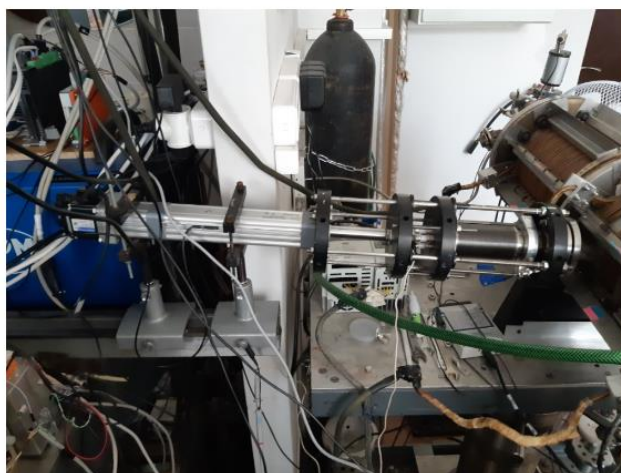


Рисунок 2.2 Измерительный узел зонда в сборе

Зонд включает коллектор, окруженный керамическим материалом. Электрод изготовлен из вольфрамовой проволоки, закрепленной в трубке из высокотемпературной технической керамики  $MgO$ . Длина электрода, контактирующего с плазмой – 3 мм, а диаметр – 1 мм.

Для анализа плазмы в установке ПЛМ-М принято решение о переносе зондового измерительного узла с установки ПЛМ. После его успешного монтажа были проведены эксперименты по измерению ВАХ плазмы (рисунок 2.3).

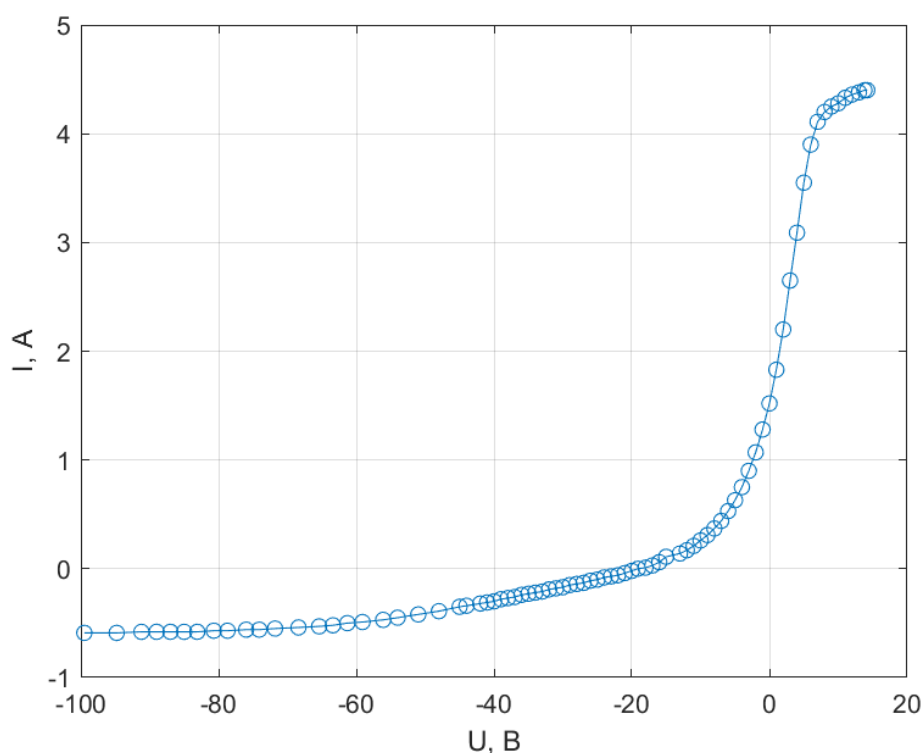


Рисунок 2.3 ВАХ ленгмюровского зонда

С её помощью определены основные характеристики плазмы в установке ПЛМ-М:

#### 1) Температура и концентрация электронов

Для определения температуры электронов построена электронная ветвь ВАХ (рисунок 2.4).

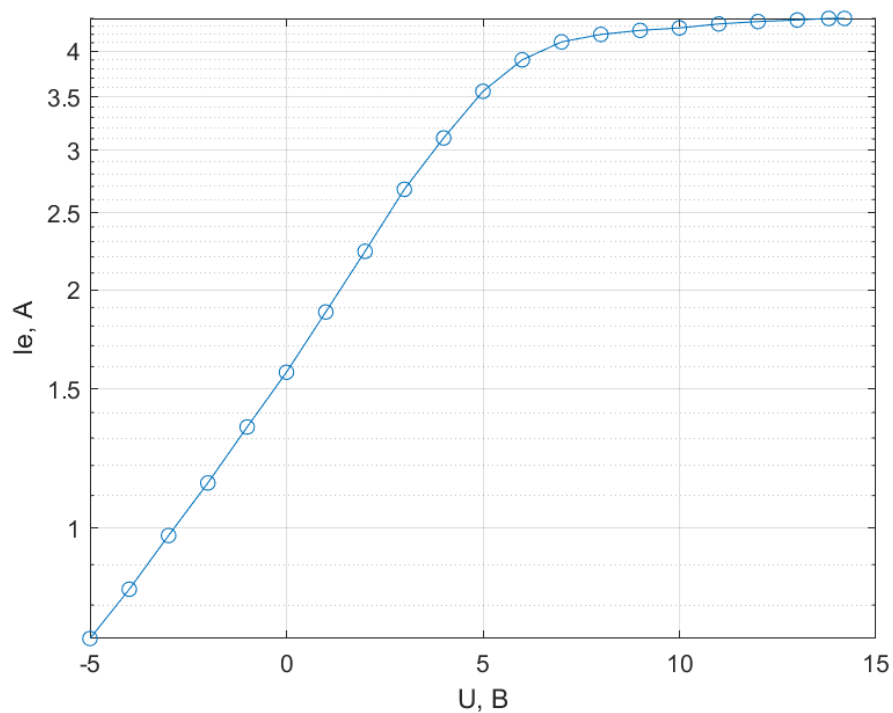


Рисунок 2.4 Электронная ветвь ВАХ

Зависимость тока с логарифмическим масштабом является прямолинейной до потенциала пространства. Её наклон и отражает величину температуры:

$$\frac{1}{T_e} = \frac{-k}{e} \frac{d \ln I_e}{dU}, \quad (16)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности,

$T_e$  – температура электронов,

$e$  – заряд электрона,

$U$  – потенциал,

$I_e$  – ток электронной ветви ВАХ.

Фактически значение температуры электронов в электронвольтах равно изменению  $U$  в вольтах, соответствующему изменению логарифма тока на единицу:

$$T_e \approx 2,7 \text{ эВ}. \quad (17)$$

После определения температуры электронов, концентрацию электронов можно найти из выражения (18).

$$n_e[\text{см}^{-3}] = \frac{I_e(U_s)}{eS\sqrt{\frac{k \cdot T_e}{2\pi m}}} = \frac{3,74 \cdot 10^8 I_e(U_s)[\text{мА}]}{S[\text{см}^2]\sqrt{T_e[\text{эВ}]}} \quad (18)$$

где  $U_s$  – потенциал пространства,

$S$  – площадь зонда.

$$n_e = \frac{3,74 \cdot 10^8 \cdot 3559}{0,22 \cdot \sqrt{2,7}} = 3,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} = 3,7 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}. \quad (19)$$

## 2) Концентрация ионов

Концентрацию ионов можно вычислить по приближенной формуле (20).

$$n_i[\text{см}^{-3}] = 10^{10} \frac{\sqrt{A} \cdot I_+[\text{мА}]}{S[\text{см}^2]\sqrt{T_e[\text{эВ}]}} \quad (20)$$

где  $A$  – атомный вес иона,

$I_+$  – ионный ток насыщения.

$$n_i = 10^{10} \frac{\sqrt{4.002602 - 0.00054858} \cdot 580}{0.22 \cdot \sqrt{2,7}} = 3,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} = 3,2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}. \quad (21)$$

## ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 2

В разделе 2.1 приводится описание установки ПЛМ-М. В ходе дипломной работы будут проведены анализы плазмы и наноструктурированной поверхности, получаемые на данной установке.

В разделе 2.2 приведено теоретическое описание зондовой диагностики на основе зонда Ленгмюра, для определения параметров плазмы установки ПЛМ-М обработана ВАХ, полученная с помощью зонда Ленгмюра.

## **ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЯ ЗОНДАМИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ФОРМИРОВАНИЮ СТРУКТУР ТИПА «ПУХ» НА ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛАХ**

### **3.1 ЭКСПЕРИМЕНТЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ОБРАЗЦАМИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ ТИПА «ПУХ»**

Наноструктура типа «пух» образуется на поверхности металлов при облучении в гелиевой плазме. Для ее формирования необходимо соблюдение определенных условий: необходимая величина потока ионов гелия, определённый интервал энергий ионов гелий, необходимая температура подложки и длительность нахождения образца в плазме. Работы, направленные на понимание процесса образования наноструктуры типа «пух», проводятся на установке ПЛМ-М.

В ходе экспериментов на установке ПЛМ-М образцы вольфрама размером 2 см x 2 см облучались в гелиевой плазме, плоскость поверхности была обращена в сторону катода. Условия облучения образца в ходе эксперимента:

- температура образцов при облучении была от 800 °С до 970°С;
- время облучения плазмой было около 209 минут;
- напряжение, подаваемое на образцы, находилось в диапазоне от -100 Вольт до +30 Вольт (точный диапазон напряжений на образце выбирался в каждом эксперименте отдельно в зависимости от потенциала плазмы).

Проведены систематические исследования вольфрамовых образцов до и после плазменного облучения. Анализ полученных микрофотографий методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской спектроскопии показал формирование наноструктурированной высокопористой поверхности на всех этих образцах. На вольфрамовых мишенях, изначально гладких, устойчиво формируется наноструктурированная высокопористая поверхность со структурой типа «пух» (рисунок 3.1).

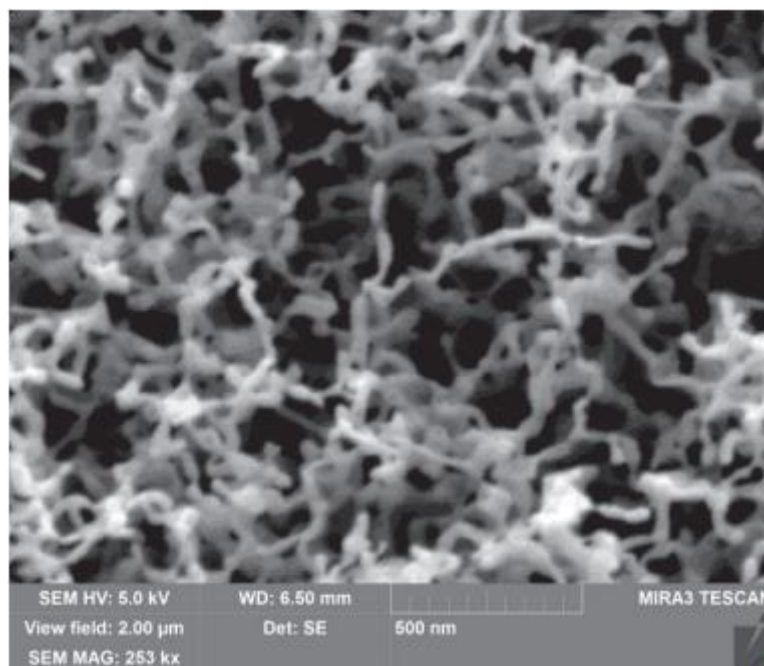


Рисунок 3.1 Вольфрамовая пластина с высокопористой наноструктурой типа «пух» после обработки в ПЛМ

На вольфрамовых образцах обнаружены два типа поверхности - редкий и плотный наноструктурированный «пух», рисунок 3.2, размер волокон при этом одного масштаба - диаметр от 20 до 50 нанометров, диаметр каждого волокна примерно однороден по высоте. Волокна «пуха» формируются с поверхности вольфрама, структура такой поверхности состоит из зерен размером около 10 мкм х 1 мкм. Средняя высота слоя пуха около 1 мкм, максимальная высота 1,5 мкм. Выявлено большое количество дефектов на поверхности волокон и вариации диаметров волокон на разных участках поверхности. Проведённый металлографический анализ сканирующим электронным микроскопом в режиме обратно рассеянных электронов выявили, что структура волокон «пуха» имеет равномерный элементный состав без локализации примесей.

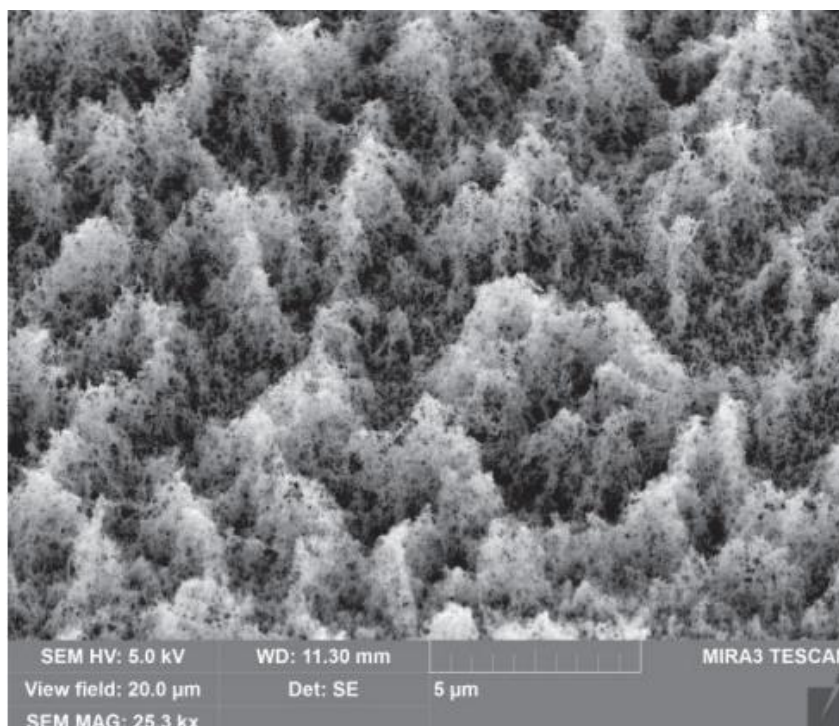


Рисунок 3.2 Плотный наноструктурированный пух на вольфраме

Важную роль в получении пористых структур играет температура. Проведены эксперименты по определению пороговых температур образования наноструктурированной поверхности «пух». Из-за способа крепления образца происходит снижение температуры в центре задней части за счёт стока тепла через стержень. Таким образом, оказалось, что температура в центре ниже, чем на ее краю. По итогам экспериментов по краю образца на лицевой стороне роста пуха не было обнаружено. Температура поверхности в центре достигала 1170 К, на краю была выше. На краю произошла рекристаллизация поверхности без плавления.

Общий градиент температуры, с учетом геометрических размеров образца, по оценкам не превышал 100 К. Таким образом температуру в 1200 К можно считать пороговой для роста пористых структур при облучении вольфрама в гелиевой плазме в установке ПЛМ-М.



### 3.2 ПАРАМЕТРЫ ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

В ходе эксперимента с помощью зонда производилась запись значений около секунды. Период между значениями составлял 1 мкс, то есть была произведена запись экспериментальных данных длиной сто тысяч точек. Для более подробного анализа плазменного разряда и упрощения построения графиков в математическом пакете *MATLAB* этот ряд разделён на отдельные участки. Далее анализ сигнала проводится для каждой части в отдельности. Вид разделённых участков представлен на рисунке 3.3.

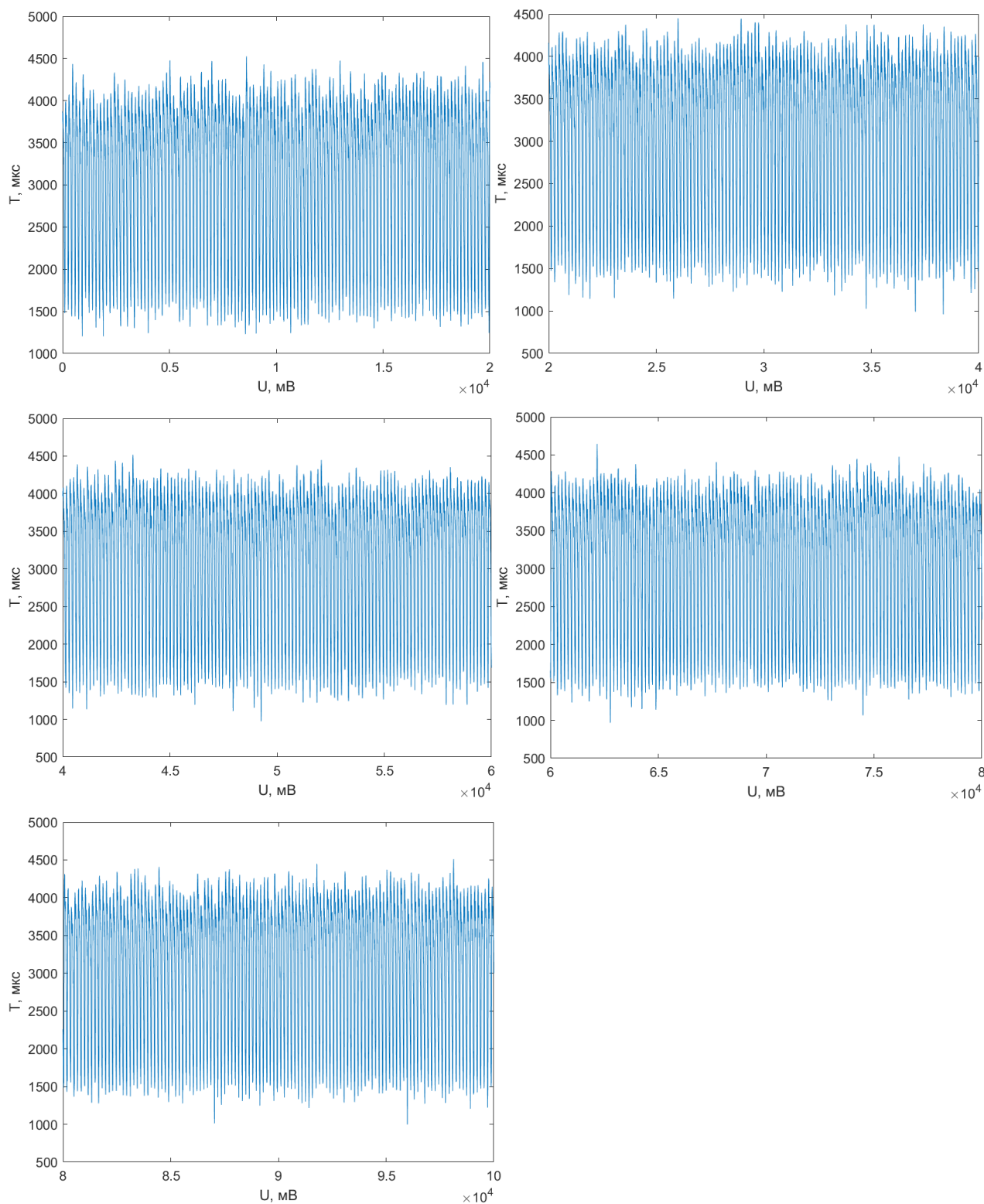


Рисунок 3.3 Построение измеренного плавающего потенциала ПЛМ-М

Для каждой части анализируемого сигнала построены гистограммы, позволяющие рассмотреть области значений, которые определяют типичные масштабы турбулентности в плазме (рисунок 3.4).

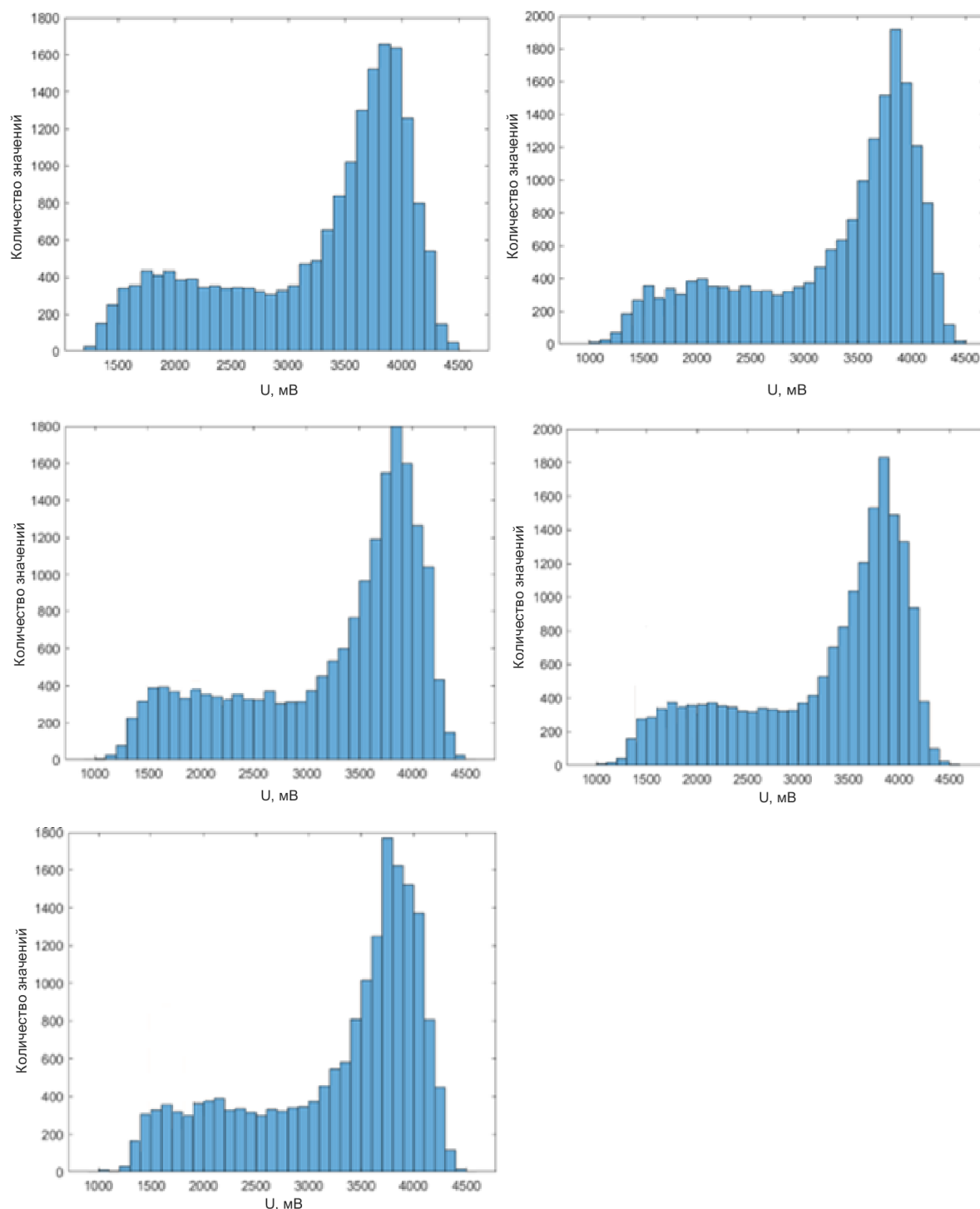


Рисунок 3.4 Построение гистограмм для частей разряда ПЛМ-М

На каждой гистограмме, построенных для разных участков разряда, видна асимметрия в распределении и наличие нескольких пиков, что говорит об отличии от Гауссова распределения. Для каждого отрезка были посчитаны статистические характеристики - коэффициенты асимметрии и эксцесса (рисунки 3.5 и 3.6). Результаты расчетов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Коэффициенты асимметрии и эксцесса для установки ПЛМ-М

№	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
1	-0,6158	1,9252
2	-0,6326	1,9460
3	-0,6328	1,9455
4	-0,6282	1,9367
5	-0,6270	1,9268

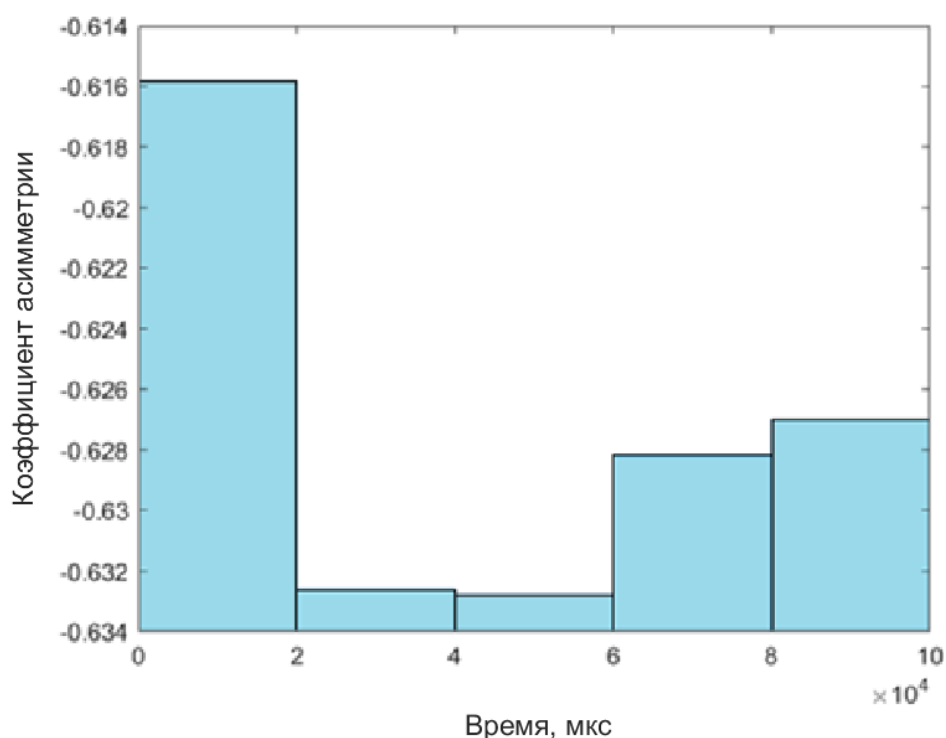


Рисунок 3.5 Построение коэффициента асимметрии для частей разряда ПЛМ-М

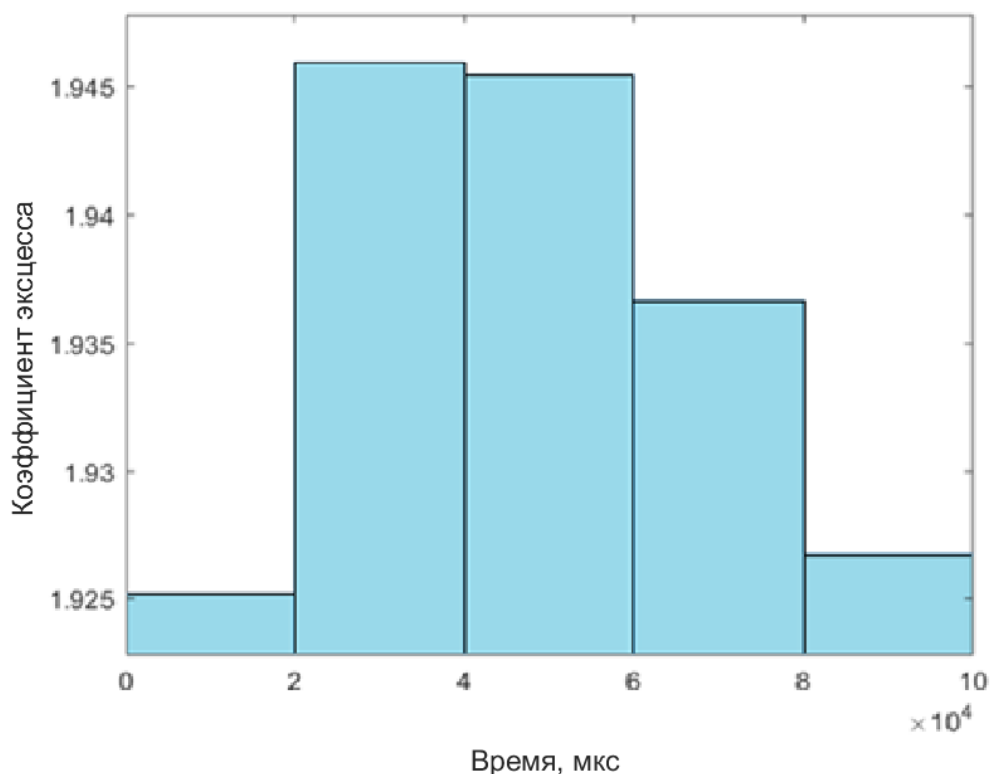


Рисунок 3.6 Построение коэффициента эксцесса для частей разряда ПЛМ-М

С помощью коэффициента асимметрии и эксцесса можно определить отличие распределения от нормального. Если распределение нормально, то его коэффициент асимметрии равен 0, а коэффициент эксцесса равен 3.

Положительный эксцесс показывает, что пик имеет острую вершину. Отрицательный знак показателя асимметрии говорит о наличии левосторонней асимметрии.

Для более подробного анализа плазменного разряда применяется преобразование Фурье: представление сигнала в частотной области, с помощью его разложения в виде бесконечного количества синусоид с определенными фазами и амплитудами. Такое представление сигнала позволяет обнаружить диапазоны частот, которые являются преобладающими среди других. Разложение на спектры Фурье применено для каждой части плазменного разряда (рисунок 3.7).

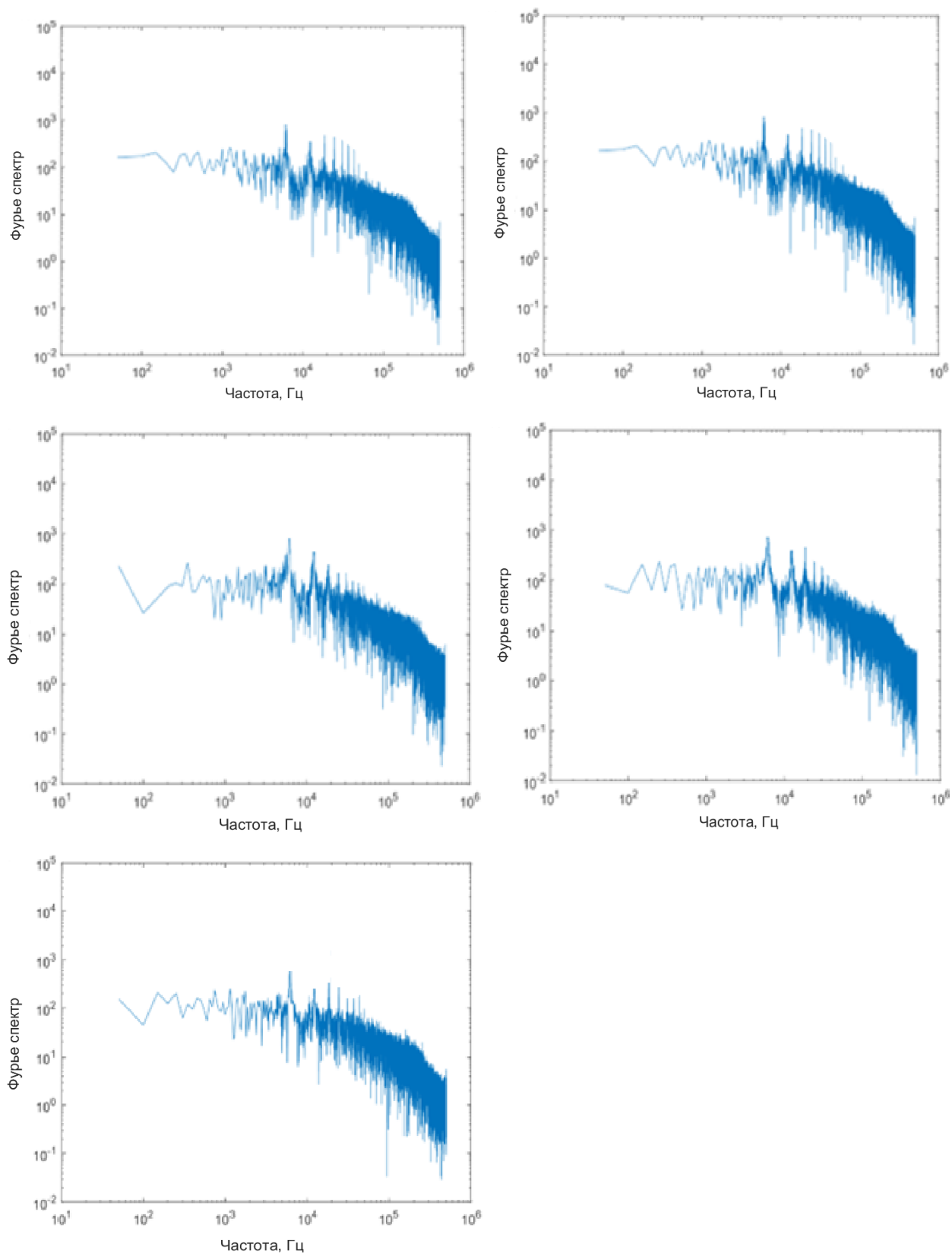
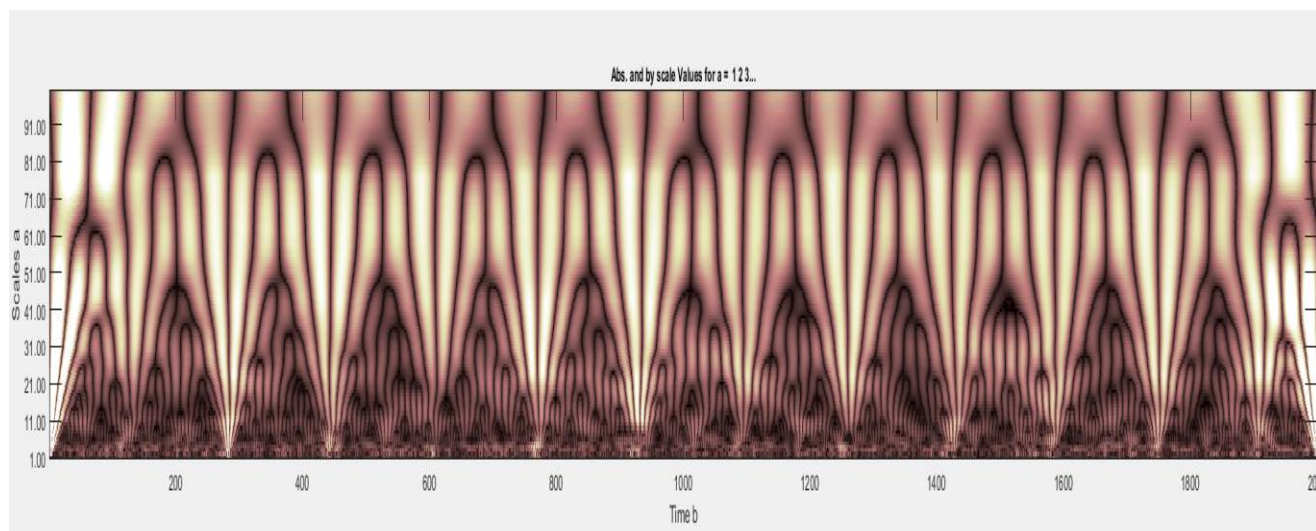


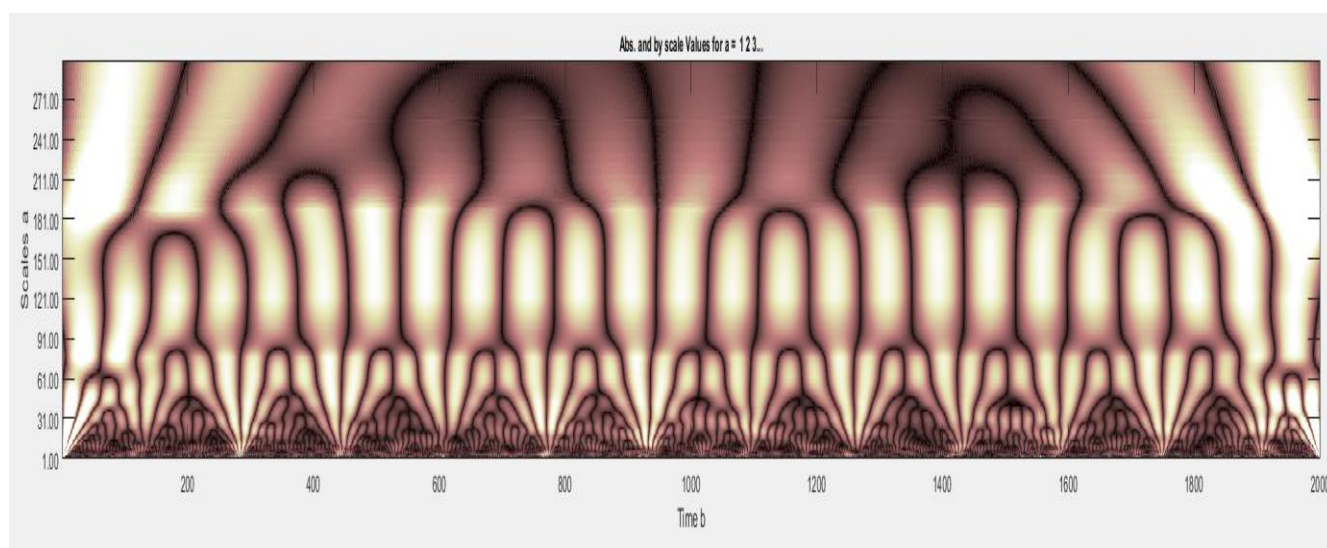
Рисунок 3.7 Построение спектров Фурье для плазменного разряда ПЛМ-М

Спектры флуктуаций плавающего потенциала уширены, что говорит о наличие турбулентного состояния плазмы.

Для определения пространственных масштабов и их локализации в функции применяется метод анализа – вейвлет-преобразование. Такой метод отличается от преобразования Фурье тем, что сигнал представляется не бесконечным количеством тригонометрических функций, а волной с ограниченным числом циклов(вейвлет). Позволяет наглядно увидеть каскадность процесса и типичные масштабы времени (рисунок 3.8).



а)



б)

Рисунок 3.8 Вейвлет-преобразование для плазменного разряда установки ПЛМ-М:

а) масштаб 1 – 100 мкс; б) масштаб 1 – 300 мкс

Далее в работе проведено сравнение статистических и спектральных характеристик плазменных разрядов, полученных на установке ПЛМ-М и токамаке Т-10. Построены гистограммы для плазменных разрядов в установках Т-10 и ПЛМ-М на рисунке 3.9.

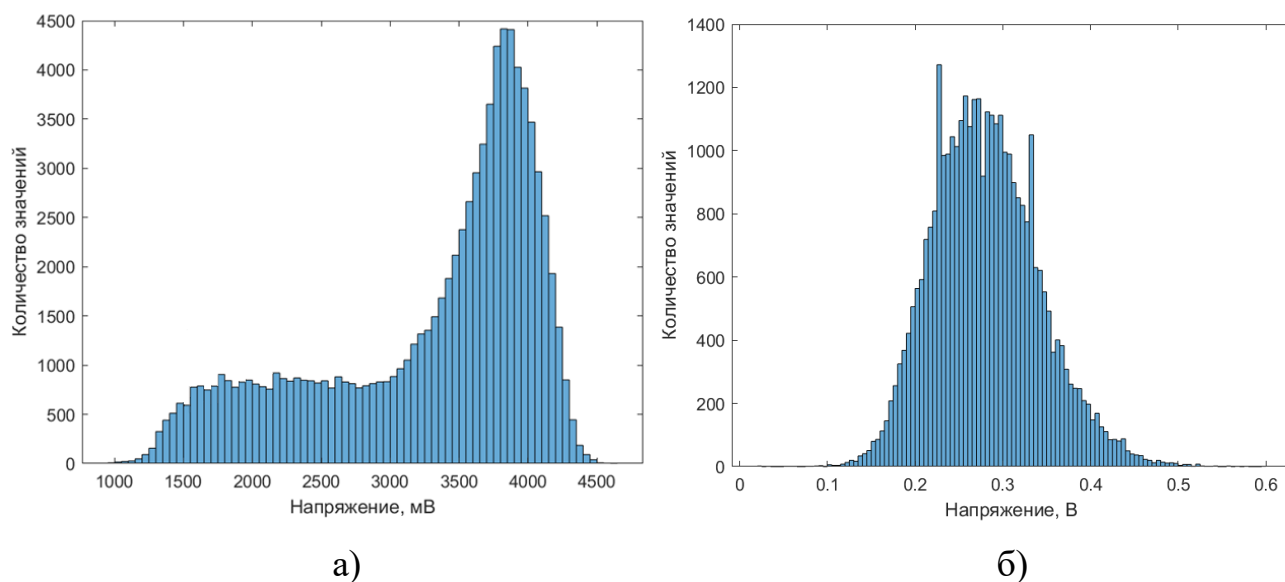


Рисунок 3.9 Гистограммы для плазменного разряда:  
а – ПЛМ-М; б – Т-10

Заметно сильное отличие от нормального распределения на обоих графиках. Об этом говорят и вычисленные коэффициенты асимметрии и эксцесса, представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Коэффициенты асимметрии и эксцесса для разрядов установки ПЛМ-М и Т-10

	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
ПЛМ-М	-0,6273	1,9364
Т-10	0,3876	3,2641

В установке Т-10 коэффициент асимметрии получился положительный, что говорит о наличии правосторонней асимметрии в отличие от ПЛМ-М.



Положительный эксцесс указывает на то, что пик в обеих установках выше, чем пик нормального распределения.

Произведён анализ плазменного разряда в ПЛМ-М и Т-10 с помощью преобразования Фурье. На графиках можно наблюдать сходное между ПЛМ-М и Т-10 уширение спектра, что говорит о признаке турбулентного состояния плазмы как в ПЛМ-М, так и в Т-10 (рисунок 3.10).

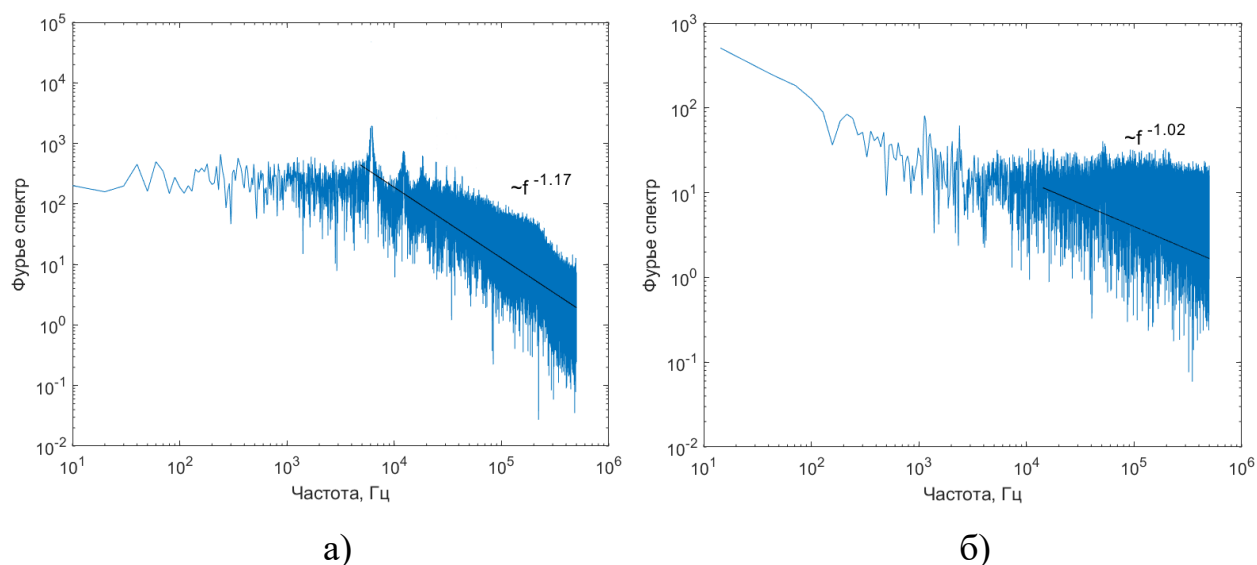
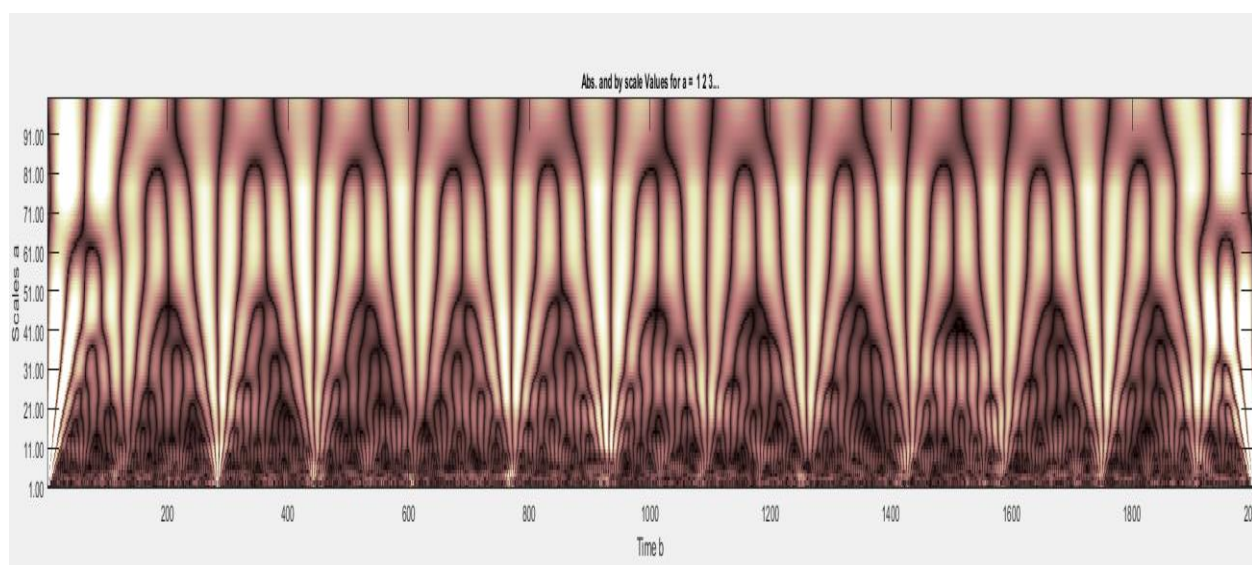


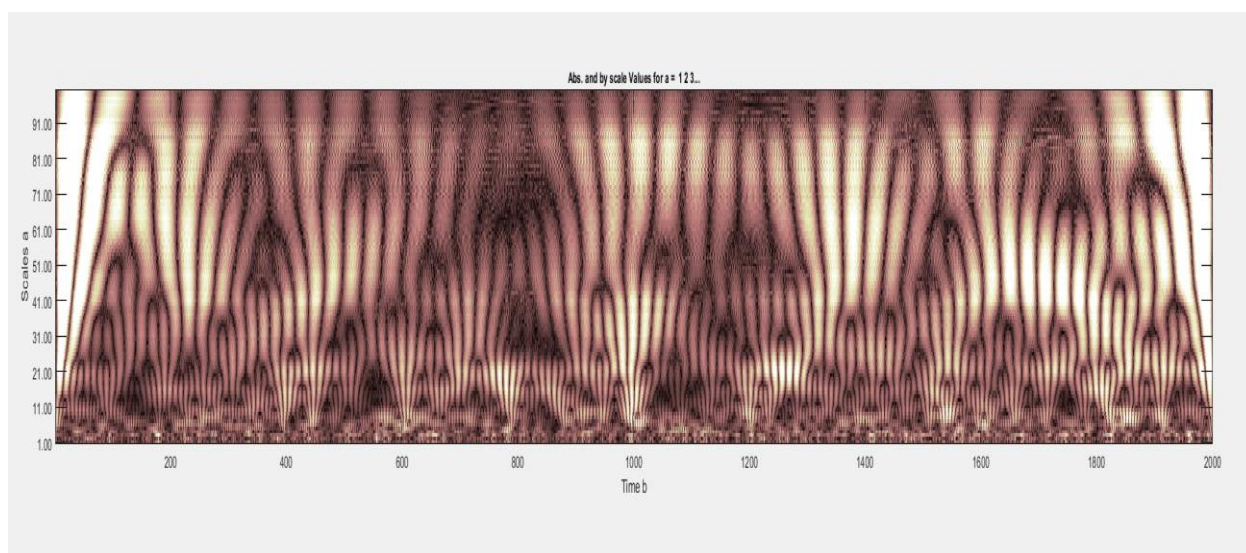
Рисунок 3.10 Спектры Фурье для установок:  
а – ПЛМ-М; б – Т-10

В литературе [7] приводятся данные о том, что спектр турбулентности имеет плато до некоторой частоты, которая находится в пределах  $\sim 10 - 100$  кГц в зависимости от размеров установки, выше которой начинает падать по степенному закону с показателем  $\sim 1 - 4$ . На полученных спектрах для токамака Т-10 и установки ПЛМ-М спад спектра происходит с показателем 1,02 и 1,17 соответственно.

Далее приведено сравнение спектральных анализов типа вейвлет-преобразования. Для плазменных разрядов обеих установок видны схожие фрактальные структуры. Это говорит о том, что свойства турбулентности аналогичны в различных установках (рисунок 3.11).



а)



б)

Рисунок 3.11 Сравнение спектров вейвлет-преобразования:

а – ПЛМ-М; б – Т-10

Вейвлет-преобразование иллюстрирует наличие иерархических структур в обоих исследуемых сигналах, что говорит о их корреляции. Такие свойства можно объяснить наличием сильной турбулентности.

На сигналах токамака Т-10 видна схожая структурность, что и на ПЛМ-М. Каскадная структура говорит о наличие связи между масштабами, то есть корреляционные связи говорят о нелинейной связи между масштабами, а это является также одним из свойств турбулентности. Из этого можно сделать вывод о том, что свойства турбулентности схожи для различных плазменных установок.

Для анализа свойств турбулентности применяется параметр Хёрста( $H$ ). Показатель  $H$  является мерой самоподобия стохастического процесса и принимает значение  $0 < H < 1$ .

Для вычисления в данной работе использовались вейвлет-методы. Результаты вычисления представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Показатель Хёрста для разрядов установки ПЛМ-М и Т-10

Установка	Показатель Хёрста
ПЛМ-М	0,7682
Т-10	0,8543

Величина показателя Хёрста больше 0,5 является типичной для плазмы в различных установках и говорит о наличие дальнедействующей корреляции. Такое значение  $H$  приводится в результатах обработки данных с токамаков *DIII-D*, *Tore Supra* [11, 12].

### **ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 3**

Рассмотрены эксперименты в установке ПЛМ-М для формирования наноструктуры типа «пух», приведены типичные условия облучения образца в плазме и СЭМ микрофотографии получаемой поверхности.

В пакете *MATLAB* разработана программа для анализа сигналов с различных установок, полученных с помощью зондовой диагностики.

В пакете *MATLAB* с помощью программы построены гистограммы, спектры Фурье, вейвлет преобразования. Рассчитаны коэффициенты асимметрии, эксцесса, показатель Хёрста.

Проведено сравнение спектральных и статистических характеристик сигналов, полученных в турбулентной плазме установок ПЛМ-М и токамака Т-10. Обнаружено сходство между исследуемыми параметрами. По результатам анализа следует сделать вывод о том, что свойства турбулентной плазмы универсальны для различных установок.

## ГЛАВА 4. РАСЧЁТ ПОТЕНЦИАЛА НАД СТРУКТУРОЙ ТИПА «ПУХ»

Электрическое поле вблизи поверхности материала, которая контактирует с плазмой, в термоядерной установке влияет на свойства краевой плазмы и движение мелких пылевых частиц. Модели описания взаимодействия плазмы с материалом обычно рассматривают гладкую форму поверхности, ограничивающей краевую плазму. В отличие от этого, реальные поверхности в термоядерных установках имеют различные деформации.

Анализ наноструктурированной поверхности показал, что она обладает стохастической вариацией высот. Поверхности имеют стохастическую топографию на масштабах от  $\sim 10$  нанометров до  $\sim 100$  микрометров с нетривиальным самоподобием структуры. Это указывает на наличие дальнедействующих корреляций и степенных законов, которые могут оказывать влияние на значение электрического поля и динамику частиц пыли в электрическом поле. Неравномерное потенциальное поле над наноструктурированной поверхностью может вносить влияние в поведение мелкой пылинки, приводящее к её полету в сторону активной зоны термоядерного реактора.

Было произведено исследование электрического потенциала в области, ограниченной реальным профилем и плоской границей (рисунок 4.1). Математическая постановка задачи заключается в рассмотрении линеаризованного уравнения Пуассона в слое оболочки для потенциала  $\phi$ :

$$\Delta\phi = \frac{\varphi}{\lambda_D^2}, \quad (22)$$

где  $\lambda_D$ - дебаевский радиус.

$$\lambda_D = 740 \cdot \sqrt{\frac{T[\text{эВ}]}{n[\text{см}^{-3}]}} = 740 \cdot \sqrt{\frac{10}{10^{14}}} = 0,0002 \text{ см} = 2 \text{ мкм}, \quad (23)$$

где  $T$ - температура электронов,  $n$  - концентрация электронов.

Значения потенциала на наноструктурированной поверхности ( $\phi = 0$ ) и на плоской противоположной границе ( $\phi = 1$ ) остаются фиксированными. Потенциалы на боковых вертикальных линиях, ограничивающих рассматриваемую систему, также фиксируются с линейным изменением между значениями потенциалов нижней и верхней плоской границы.

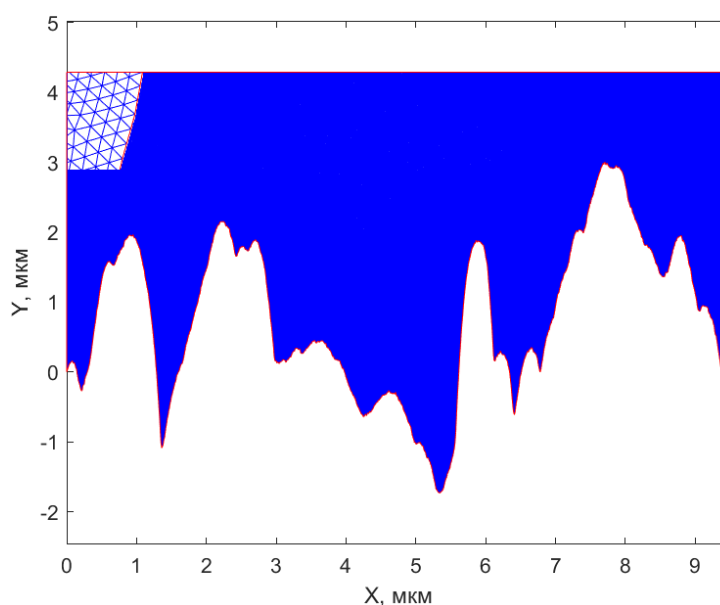


Рисунок 4.1 Профиль наноструктурированной поверхности с заданной сеткой

Полученная линейная система решается с помощью пакета программ *MATLAB* (рисунок 4.2).

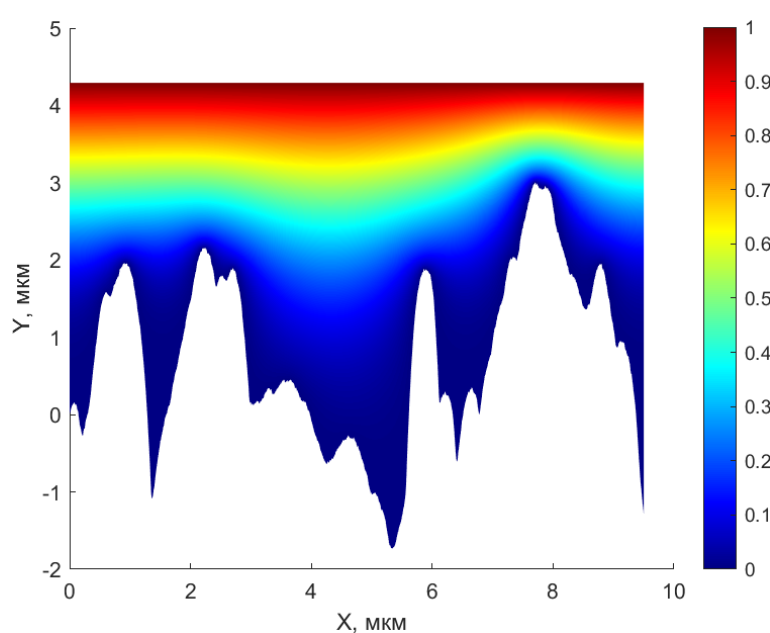


Рисунок 4.2 Решение уравнения Пуассона для рассматриваемой системы

После интегрирования уравнения (22) получаем набор эквипотенциальных линий (рисунок 4.3).

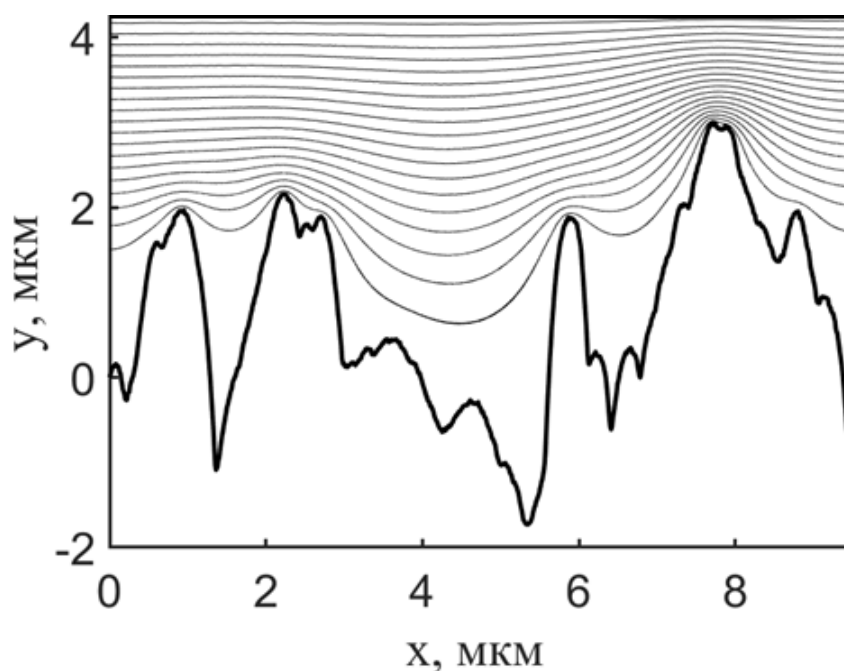


Рисунок 4.3 Распределение эквипотенциальных линий над наноструктурированной поверхностью

В главе 1.3 было показано, что для увеличения тока автоэлектронной эмиссии необходимо повышать локальную напряженность электрического поля у поверхности катода. Как видно из полученного решения, наноструктурированная поверхность приводит к значительному искривлению эквипотенциальных линий, то есть у поверхности будет наблюдаться высокий градиент напряженности электрического поля. Из этого следует, что наноструктурированная поверхность может рассматриваться как катод для получения тока автоэлектронной эмиссии, описываемый уравнением Фаулера-Нордгейма.

Шероховатость эквипотенциальных линий постепенно изменяется к верхней границе. В ходе данной работы форма эквипотенциальных линий анализировалась с помощью фрактальной размерности. В программе *MATLAB* оценивался показатель Хёрста,  $H$ , который характеризует неровность полученных линий, с помощью метода *Average Wavelet Coefficient (AWC)*. Профиль

наноструктурированной поверхности и эквипотенциальных линий характеризуются  $H > 1/2$ , что означает наличие памяти и дальнедействующей корреляции. Связь фрактальной размерности  $D$  с показателем Хёрста:

$$D = 2 - H \quad (24)$$

График зависимости фрактальной размерности от минимального расстояния до поверхности показан на рисунке 4.4.

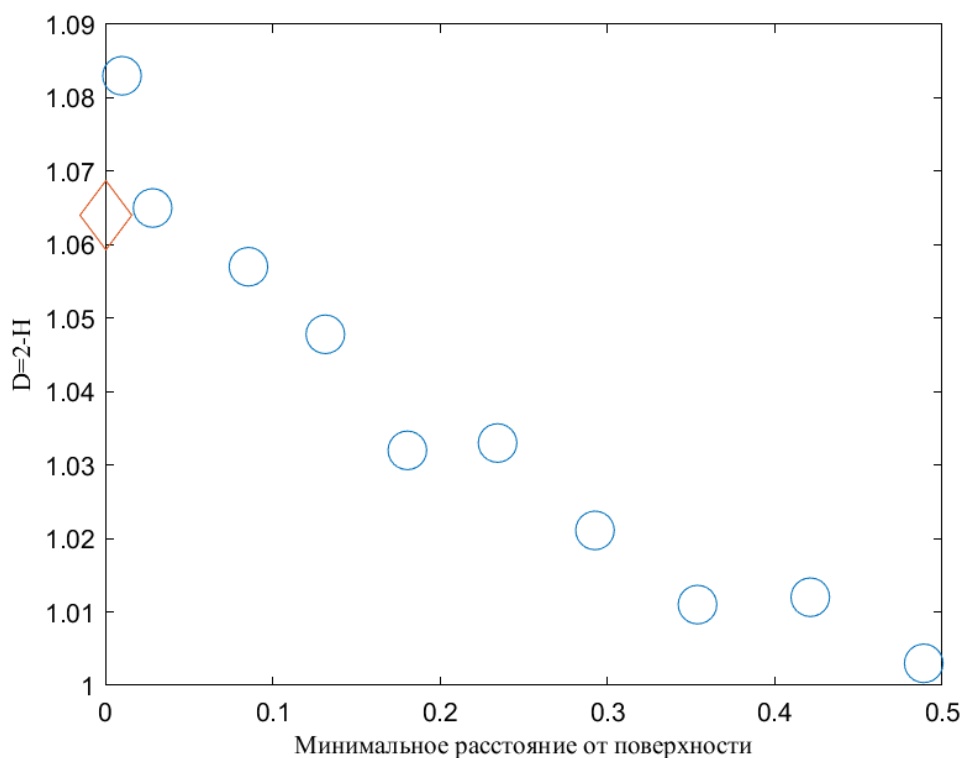


Рисунок 4.4 Значение фрактальной размерности

Фрактальная размерность падает со значения, относящегося к размеру поверхности до 1 (размерность гладкой линии). Погрешность на рис. 2 составляет ~10-15% по оценке метода определения показателя Хёрста. Падение фрактальной размерности не является быстрым, отсутствует экспоненциальное убывание ряда, полученных значений. Это означает, что дальнедействующая корреляция в потенциальном поле строго накладывается нетривиальной фрактальной структурой поверхности с  $H > 1/2$ .



Такое наложение следует рассматривать как проблему турбулентности плазмы: стохастическое граничное условие может вносить случайные возмущения. Шероховатость эквипотенциальных линий влияет на динамику пылевых частиц. Бильярд [13] — удобная модель, описывающая движение частиц пыли по фрактальной поверхности. В соответствии с граничной геометрией динамика бильярдной частицы может быть в зависимости от начального условия, регулярной или совершенно хаотической. Эта проблема связано с неограниченным возрастанием энергии, известным как ускорение Ферми. В случае достаточно гладкой граничной поверхности рост скорости частицы ограничен. В противном случае скорость может увеличиваться до бесконечности. Численные и аналитические исследования возмущенного бильярда [13] показали, что бильярд обладает сильными хаотическими свойствами. Зависимость скорости частиц от числа  $N$  столкновений с границами имеет вид  $v(N) \sim v_0 N^{\frac{1}{2}}$ .

Ограничение рассматриваемой области между шероховатой поверхностью и плазмой с турбулентными колебаниями электрического поля, приводит к возникновению ускорения Ферми. Принимая типичную скорость пыли  $v_0 \sim 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , масштаб длины пристеночной потенциальной ямы  $l \sim 1 \text{ мкм}$ , то время колебаний пылинки в такой яме за один период составляет  $\sim 10^{-7} \text{ с}$ . Когда частицы движутся в потенциальном поле с фрактальной структурой предполагается статистическое распределение их траекторий. У некоторых частиц пыли ожидается многократный отскок в потенциальной яме с фрактальной структурой (рис. 4.3). Если предположить, что такая пылевая частица будет заключена в одну и ту же область (бильярдную задачу) за время 100-1000 секунд количество колебаний может составлять  $N \sim 10^8 - 10^{10}$  (частица может быть устранена за счет других процессов). Можно грубо оценить увеличение скорости

$$v(N) \sim v_0 N^{\frac{1}{2}} \sim (10^4 - 10^5) v_0 \sim 100 - 1000 \frac{\text{км}}{\text{с}}. \quad (25)$$

В реакторе это может привести к значительному притоку частиц пыли в область краевой плазмы. Чтобы оценить такой поток, следует учитывать статистическое распределение траекторий пыли в неравномерном потенциальном поле (рис. 4.3).

## **ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 4**

В пакете *MATLAB* разработана программа для решения уравнения Пуассона, граничное условие которого включает реальную наноструктурированную поверхность.

Получено распределение эквипотенциальных линий над профилем наноструктурированной поверхности.

Определены показатель Хёрста и значение фрактальной размерности для рассматриваемой поверхности и полученных эквипотенциальных линий, получена зависимость фрактальной размерности от расстояния от профиля материала.

На основании бильярдной модели выполнена грубая оценка увеличения скорости частиц пыли в области наноструктурированной поверхности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Получена экспериментальная ВАХ с помощью зондовой диагностики на плазменной установке ПЛМ-М. После обработки ВАХ в пакете *MATLAB* рассчитаны основные характеристики плазмы.
- В пакете *MATLAB* построены гистограммы, спектры Фурье, вейвлет преобразования, рассчитаны коэффициенты асимметрии, эксцесса, показатель Хёрста для плазменного разряда.
- Проведено сравнение спектральных и статистических характеристик сигналов, полученных в турбулентной плазме установок ПЛМ-М и токамака Т-10. Обнаружено сходство между исследуемыми параметрами. По результатам анализа можно сделать вывод о том, что свойства турбулентной плазмы универсальны для различных установок.
- Получено распределение эквипотенциальных линий над реальным профилем наноструктурированной поверхности. Определены показатель Хёрста, значение фрактальной размерности для рассматриваемой поверхности и полученных эквипотенциальных линий, получена зависимость фрактальной размерности от расстояния от профиля материала.
- На основании бильярдной модели выполнена грубая оценка увеличения скорости частиц пыли в области наноструктурированной поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Enhanced growth of large-scale nanostructures with metallic ion precipitation in helium plasmas / S. Kajita, S. Kawaguchi, N. Ohno, N. Yoshida // Scientific Reports. – 2018. – Т. 8. – № 56.
2. Formation of Nanostructured Tungsten with Arborescent Shape due to Helium Plasma Irradiation / S. Takamura, N. Ohno, D. Nishijima, S. Kajita // Plasma and Fusion Research. – 2006. – Т. 1. – № 051.
3. Плазменная установка НИУ «МЭИ» для испытаний тугоплавких металлов и создания высокопористых материалов нового поколения / В.П. Будаев, С.Д. Федорович, М.В. Лукашевский, Ю.В. Мартыненко // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2017. – Т. 40. – № 3. – С. 23-36.
4. Nanostructuring of Iron Surfaces by Low-Energy Helium Ions / I. Tanyeli, L. Marot, M.CM van de Sanden, G. De Temmerman // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2014. – Т. 6. – № 5. – С. 3462-3468.
5. High-heat flux tests of tungsten divertor mock-ups with steady-state plasma and e-beam / V.P. Budaev, S.D. Fedorovich, A.V. Dedov et al. // Nuclear Materials and Energy. – 2020. – Т. 25. – № 100816. – С. 2-4.
6. Мартыненко, Ю.В. Модель образования «пуха» на поверхности вольфрама / Ю.В.Мартыненко, М.Ю.Нагель // Физика плазмы. – 2012. – Т. 38. – №12. – С.1082-1086.
7. Будаев, В. П. Наблюдения перемежаемости и обобщённого самоподобия в турбулентных пограничных слоях лабораторной и магнитосферной плазмы: на пути к определению количественных характеристик переноса / В. П. Будаев, С. П. Савин, Л. М. Зелёный // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181. – № 9. – С. 905-952.
8. Гапонов, В.И. Электроника / В. И. Гапонов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 1960. – 151 с.

9. Месяц, Г. А. Эктон – лавина электронов из металла / Г. А. Месяц // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165. – №. 6. – С. 602-626.
10. Field emission from metal surfaces irradiated with helium plasmas / D. Hwangbo, S. Kajita, N. Ohno, D. Sinelnikov // IEEE Trans. Plasma Sci. –2017. – Т. 45. –№ 8. – С. 2080–2086.
11. Carreras, B.A. Structure and properties of the electrostatic fluctuations in the far scrape-off layer region of Alcator C-Mod / B. A. Carreras, V. E. Lynch, B. LaBombard // Physics of Plasmas. – 2001. – Т. 8. – № 3702.
12. Antar, G.Y. Experimental Evidence of Intermittent Convection in the Edge of Magnetic Confinement Devices / G. Y. Antar, S. I. Krasheninnikov, P. Devynck et al. // Physical Review Letters. – 2001. – Т. 87. – № 6.
13. Loskutov, A. Particle Dynamics in Time-Dependent Stadium-Like Billiards / A. Loskutov, A. Ryabov // Journal of Statistical Physics. – Т. 108. – № 5. – С. 995-1014.