

На правах рукописи

УДК 539.234

Бычков Сергей Павлович

**Разработка и исследование
лучистых нагревательных устройств
для вакуумно-термического оборудования**

05.27.06– Технология и оборудование для производства полупроводников,
материалов и приборов электронной техники



Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

Научный руководитель к.т.н., доцент **Степаньянц Юрий Рубенович**

Научный консультант д.т.н., профессор Панфилов Юрий Васильевич

Официальные оппоненты:

Шаповалов Виктор Иванович
доктор технических наук, профессор
профессор Кафедры Физическая электроника и технология (ФЭТ) Санкт-Петербургского электротехнического университета (СПбГЭТУ) «ЛЭТИ» им.В.И.Ульянова (Ленина)

Ризаханов Ражудин Насрединович
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
начальник Центра по применению нанотехнологий в энергетике и электроснабжении космических систем Государственного научного центра
Федерального унитарного предприятия
«Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»

Ведущая организация:

ОАО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения» (ОАО НИИТМ)

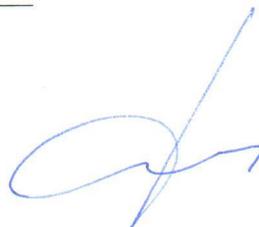
Защита диссертации состоится «___» _____ 2019 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.18 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, стр.1, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваш отзыв в 1 экземпляре просим высылать по указанному адресу Ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.18.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., доцент



Мешков С.А

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. Специфика проведения термообработки в современных технологических процессах электронной техники заключается в том, что часто требуется локальный разогрев отдельных участков обрабатываемого изделия до разных температур или какого-либо элемента изделия до заданной температуры. Технологическое воздействие в вакууме часто сопровождается выделением энергии внутри рабочей камеры, при этом в целом ряде случаев важно знать распределение температур в рассматриваемой системе тел, устанавливающееся в ней в результате диссипации выделившейся энергии. Ключевым механизмом перераспределения энергии в вакуумной рабочей камере является теплообмен излучением. Перспективной является модульная конфигурация термического оборудования, которая дает возможность быстрого изменения режима термообработки как при обработке какого-либо изделия, так и при переходе от изделия к изделию. Это делает актуальным использование интенсивных лучистых малоинерционных нагревательных устройств модульного типа, в которых в качестве нагревательного устройства используются сменные излучающие системы типа «нагреватель-рефлектор», размещаемые в рабочей камере и имеющие независимое управление.

Для выполнения расчетов при решении перечисленных выше задач требуется создание простой и универсальной инженерной методики, позволяющей определять с достаточной точностью значения температур или требуемых мощностей в системах, состоящих из нескольких взаимодействующих поверхностей с разной температурой в условиях лучистого теплообмена. Этой проблемой занимались многие исследователи. Метод А.Д. Свенчанского предполагает использование понятия «температура печи», позволяющего заменить реальные теплоотдающие поверхности некоторой идеальной средой внутреннего пространства печи. Данный подход приемлем при близких значениях температур нагревателей и стенок внутреннего объема, воздействие которых на изделие оценивается через температуру печи. Д.Б.Зворыкиным и Б.П.Байкальцевым был предложен метод расчёта отражательных печей ИК-нагрева путём деления рабочего пространства печи на зоны. Данный подход сложен с точки зрения построения расчетных моделей. Н.Н.Ермолинский и И.Б.Левитин разработали методику расчета на основе сочетания методов светотехники и теплотехники, полагая, что можно пренебречь учётом явлений лучистого теплообмена между «горячими» излучателями и гораздо более «холодными» нагреваемыми объектами и проводить расчёты по типу расчёта облучённости в светотехнике. Данный метод не даёт требуемой точности при расчёте систем с нагревом объекта выше 350°C.

Целью работы является создание научно-обоснованных методов расчета и проектирования высокоинтенсивных нагревательных устройств модульного типа для работы в установках с контролируемым составом рабочей среды, в том числе в вакууме, в условиях локального распределения температур в рассматриваемой системе тел.

Задачи исследования: 1. Определение необходимой элементной структуры модульных лучистых нагревательных устройств, создание необходимой информационной базы для выбора и компоновки их конструкции.

2. Разработка критериев и алгоритмов выбора требуемых типов и типоразмеров электрических нагревателей; материала, качества обработки, допустимых температур, формы, размеров и взаимного расположения поверхностей отражателей и внутренней поверхности рабочей камеры; надежных токоподводящих контактных групп; систем охлаждения рабочих поверхностей (теплоизоляция-футеровка, оребрение, водяное или воздушное охлаждение).

3. Получение расчетных зависимостей для определения значений параметров нагревательного устройства, обеспечивающих реализацию требуемого режима термообработки.

4. Получение экспериментальных данных в вакуумно-термических установках с локальным распределением температур и их сопоставление с результатами расчетов по разработанным математическим моделям с определением погрешностей расчетов.

5. Разработка методики расчета и проектирования нагревательных устройств вакуумно-термических установок с локальным распределением температур

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Определена взаимосвязь требуемой мощности для нагревательных устройств с теплообменом излучением типа «нагреватель-рефлектор-рабочая камера» при диффузном и зеркальном отражении рабочей поверхности рефлектора со значениями коэффициентов поглощения, отражения и пропускания взаимодействующих поверхностей с учетом их зависимости от длины волны излучения и температуры.

2. Разработан метод определения значимых угловых коэффициентов для системы тел с локальным распределением температур при учете зеркального характера отражения рабочей поверхности рефлектора.

3. Разработана и проверена экспериментально математическая модель для определения изменения температур мишени и подложки в процессах магнетронного распыления в зависимости от мощности, выделяемой в магнетроне.

Практическая ценность работы:

1. Разработана методика расчета и проектирования нагревательных модулей в вакуумно-термических установках с локальным распределением температур, включающая в себя подбор материалов и комплектующих, выбор оптимальной компоновки, конструкторскую проработку базовых элементов и узлов, расчет требуемых параметров.

2. Предложена методика расчета параметров модульного лучистого нагревательного устройства, позволяющая уже на этапе технического предложения достаточно точно рассчитать требуемую мощность, выбрать тип и подобрать типоразмеры нагревателей.

3. Предложена методика расчета системы охлаждения позволяющая рассчитать требуемые характеристики для обеспечения регулируемого изменения температуры поверхностей, участвующих в теплообмене.

4. Сформирована информационная база, достаточная для определения эффективных типов нагревателей, их формы и размеров для обеспечения требуемых температурных режимов в вакуумно-термическом оборудовании.

Методы исследования. Работа включает в себя теоретические исследования с использованием моделей теории теплообмена и гидравлики. Экспериментальные исследования проведены на лабораторном оборудовании с использованием контактных методов измерения температур. Вычисления проводились с использованием метода сальдо для расчета теплообмена излучением с применением программ Microsoft Excel, MathCad и ANSYS.

На защиту выносятся:

1. Методика анализа параметров нагревательного устройства для системы тел в условиях лучистого теплообмена, позволяющая определять необходимые характеристики нагревателя, активной и пассивной поверхностей рефлектора, нагреваемой поверхности обрабатываемого изделия и стенок рабочей камеры и изменение значений теплофизических характеристик взаимодействующих поверхностей от температуры и длины волны излучения.

2. Выведенные расчетные зависимости параметров режима нагрева, которые могут быть использованы для определения параметров нагревательного устройства, обеспечивающих проведение требуемого режима термообработки в вакуумно-термических установках.

3. Разработанная математическая модель для определения температуры мишени и подложки в процессе магнетронного распыления в зависимости от мощности, выделяемой в магнетроне, необходимая для расчета режимов магнетронного распыления как твердых, так и жидкофазных мишеней.

4. Разработанная методика расчета и проектирования нагревательных модулей для вакуумно-термического оборудования, позволяющая эффективно решать задачи разработки и модернизации нагревательных устройств для систем поверхностей с разными температурами.

Достоверность полученных автором результатов базируется на корректном применении теории теплопередачи, совпадении результатов расчетов с экспериментальными данными, использовании при проведении экспериментов современных поверенных измерительных средств и стандартных методик измерений, адекватности и непротиворечивости используемых моделей.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции «Образование через науку» 17-19 мая 2005г (Москва), XI Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности» 8-10 сентября 2005г (Москва), Международной научно-технической конференции «Производительность и надежность технологических систем в машиностроении» 20-25 мая 2015г (Москва), 25-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии-2018» 05-07 июня 2018г.

Публикации. Основное содержание и результаты работы изложены в 6 научных работах, в том числе 4 статьи в журналах по перечню ВАК РФ и 1 публикация, индексируемая в Scopus, общим объемом 3,75 п.л.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и заключения, приложения и списка литературы из 102 наименований. Работа содержит 205 страниц машинописного текста, 74 рисунка, 15 таблиц.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы работы, формулируются её цель и задачи, определены научная новизна и практическая значимость работы.

В Главе 1 проведен анализ термических процессов и оборудования, используемых в производстве изделий электронной техники, на основании результатов которого обосновывается перспективность использования модульных лучистых нагревательных устройств в современной электронной технике.

Технологические особенности термических процессов в современной технике - это прецизионность температурных режимов, высокая чистота технологической среды, гибкость системы управления. При этом термические операции в производстве изделий электронной техники обладают некоторой спецификой. Во-первых, большой объем и разнохарактерность термических операций. Во-вторых, высокие требования к параметрам термических процессов, к которым относятся состав технологической среды в рабочей камере и температурные режимы обработки. Большая часть технологических процессов при этом реализуется в вакууме или контролируемой газовой среде с давлением ниже атмосферного. В-третьих, длительность термических операций колеблется от долей секунды до нескольких часов (при напылении тонких пленок, получении р-п переходов сплавлением и эпитаксией, отжиге стеклянных изделий, термовакуумной обработке и др.). Разные способы нагрева (теплопроводностью, конвекцией, излучением или их сочетаниями) воздействуют на нагреваемый объект с разной интенсивностью, при этом от способа к способу отличаются и допустимые скорости нагрева. Например, при термовакуумной обработке электровакуумных приборов (ТВО ЭВП) реализуют термическое воздействие на все элементы конструкции прибора с целью обеспечения его работоспособности при эксплуатации, весь процесс происходит при непрерывной откачке обрабатываемого прибора.

Одной из отличительных особенностей современного вакуумно-термического оборудования является локализация поверхностей с разными температурами внутри рабочей камеры при реализации требуемого режима термообработки. Можно выделить, как минимум, три относительно независимо регулируемых температурных области: внутренняя поверхность рабочей камеры; поверхность нагревательного устройства (нагревательные элементы и рефлекторы); обрабатываемая поверхность (подложка, мишень, изделие). Наличие системы поверхностей разных температур определяется спецификой большинства типовых процессов термовакуумной обработки, а именно: локального нагрева или охлаждения обрабатываемой поверхности изделия с необходимостью обеспечения высоких скоростей нагрева или охлаждения; необходимостью термического обезгаживания стенок рабочей камеры при формировании требуемого качества вакуума в рабочем объеме установки; обеспечения холодного состояния стенок в процессе реализации главной технологической операции с целью уменьшения газовой выделенности.

Другими словами, вместо печей в электронной технике целесообразно использовать так называемые высокоинтенсивные малоинерционные модульные нагревательные устройства (МНУ). Преимуществами МНУ являются широкий диапазон рабочих температур (200-1400°С); возможность кратковременных

термических воздействий (от 1сек); возможность получения высоких скоростей нагрева (до 30-300°С/мин и выше); высокая чистота процесса при использовании реактора с «холодной стенкой»; возможность изготовления НУ малых размеров; обеспечение воспроизводимости технологического процесса; возможность получения высокой равномерности термического воздействия по поверхности; относительно малая стоимость при достаточно высокой производительности; небольшой объем камеры для обработки, позволяющий быстро менять рабочие газы и обеспечивать возможность проведения последовательных операций технологического процесса в одной и той же камере.

Такая специфика приводит к необходимости изменения методики расчета нагревательных устройств по сравнению с распространенными методиками расчета электрических печей сопротивления. Расчет нагревательных систем вакуумно-термических установок с использованием локального нагрева-охлаждения и возможностью реализации процессов быстрой термической обработки (БТО) требует выполнения действий по следующему алгоритму: расчет требуемой мощности для локального нагрева заданной поверхности до заданной температуры; разработка рекомендаций по выбору типа нагревательного элемента в зависимости от требуемой мощности, максимальной температуры нагрева и требуемого качества вакуума; разработка рекомендаций по выбору формы, размеров, материалов рефлекторов и их отражающих покрытий, чистоте обработки отражающей поверхности в зависимости от температуры нагревателей, наличия или отсутствия водяного охлаждения, требуемой конфигурации поля облученности; оценка инерционности используемых нагревательных элементов; расчет параметров систем охлаждения для осуществления БТО.

Решение этих вопросов в рамках единой методики позволяет реализовать системный подход к проектированию нагревательных устройств вакуумно-термических установок.

Глава 2 посвящена определению структуры модульных лучистых нагревательных устройств.

Модульное лучистое нагревательное устройство (МЛНУ) схематически представлено на Рис. 1. Базовая схема – это нагревательное устройство с использованием одного нагревательного модуля, самый сложный вариант МЛНУ – это нагревательное устройство с несколькими нагревательными модулями. Нагревательный модуль – это функционально законченная система, состоящая из нагревателя (нагревательного элемента) и отражателя (рефлектора). Общим случаем структурно-компоновочной схемы такого рода устройств является система из четырех тел: нагреватель с индивидуальным рефлектором и обрабатываемое изделие, размещенные внутри рабочей камеры, причем каждое из этих тел имеет свою площадь, свою температуру и свои коэффициенты поглощения (излучения). Другие варианты МЛНУ по количеству участвующих в лучистом теплообмене поверхностей в рабочей камере, представлены на Рис 1. При проектировании термического оборудования на этапе технического предложения необходимо определить тип нагревателя, форму и характер отражения рефлектора, систему охлаждения поверхностей, систему контроля и регулирования температуры при проведении термообработки.

При создании конструкторской документации, после проведения необходимых расчетов, подбирается типоразмер нагревательного элемента,

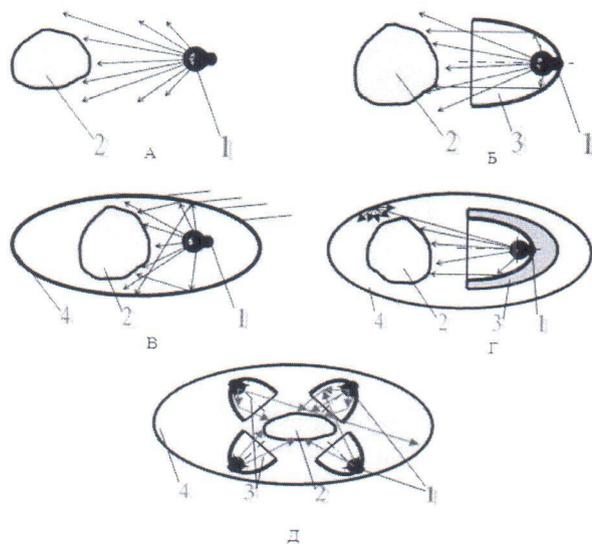


Рисунок 1. Структурно-компоновочные варианты лучистых нагревательных устройств:

А - одиночный нагреватель и изделие;

Б - одиночный нагреватель с рефлектором и изделие; В - одиночный нагреватель и изделие в рабочей камере;

Г - одиночный нагреватель с рефлектором и изделие в рабочей камере;

Д - *n* нагревателей с индивидуальными рефлекторами и изделие в рабочей камере;

1 - нагреватель; 2 - изделие; 3 - рефлектор; 4 - поверхность стенок рабочей камеры

задаются геометрические размеры рефлектора, определяются параметры системы охлаждения, определяется конфигурация системы контроля и регулирования температуры, схема расположения датчиков контроля температуры, тип и типоразмеры этих датчиков.

При выборе нагревателя источники излучения, используемые в нагревательных устройствах лучистого нагрева, должны отвечать следующим общим требованиям: малые размеры, высокая удельная мощность, большой срок службы, стабильность характеристик излучения во времени, широкий диапазон рабочих температур, малая инерционность и возможность гибкого управления потоком излучения. Выбор рефлектора определяющим образом влияет на такие параметры нагревательного устройства (НУ), как эффективность НУ, его КПД, равномерность поля облученности объектов нагрева, тепловая инерционность НУ. Для расчета лучистого теплообмена отражательных нагревательных устройств необходимо знать

следующие параметры активной отражающей поверхности: интегральный коэффициент отражения, спектральный коэффициент отражения, направленные характеристики (индикатрисы) отражения, стабильность отражения во времени при эксплуатации прибора. Данные характеристики должны быть определены, как минимум, для областей основных спектральных участков излучения используемого нагревателя (например, для ГЛН в области $\lambda=0,7-3,0\text{мкм}$), для отражающей поверхности рефлектора, значимых обширных внутренних поверхностей рабочей камеры (при использовании внутреннего реактора из кварцевого стекла - для кварцевого стекла в области $\lambda=3,5-8,0\text{мкм}$), объектов нагрева (здесь, кроме характеристик отражения, необходимо иметь данные по пропусканию излучения, то есть по прозрачности/непрозрачности объекта практически во всем используемом ИК диапазоне $\lambda=0,7-8,0\text{мкм}$). Параметрами рефлектора, обеспечивающими его оптимальное применение, являются материал рефлектора, характер отражения, форма и размеры отражающей поверхности, чистота ее обработки, допустимые температуры нагрева поверхности

рефлектора, наличие системы принудительного водяного или воздушного охлаждения.

При определении параметров системы охлаждения из приоритета поставленной задачи определяется приемлемая схема теплоотвода и теплоизоляции. Это может быть минимизация тепловых потерь посредством использования футеровки и/или теплозащитных экранов или обеспечение требуемой, достаточно низкой, температуры поверхностей стенок рабочей камеры и отражателей при помощи оребрения охлаждаемой поверхности или создания системы наружного жидкостного (чаще всего водяного или воздушного) охлаждения.

В Главе 3 выполнен вывод расчетных зависимостей на основе алгебраического способа расчета лучистого теплообмена в системах поверхностей с локальным распределением температур для расчета нагревательных устройств с теплообменом преимущественно излучением.

Типовая расчетная схема такого нагревательного устройства представлена на Рис. 2. В рассматриваемой системе тел можно выделить пять участвующих в теплообмене базовых поверхностей: нагреватель, изделие, рабочая (активная) поверхность рефлектора, обратная (пассивная) поверхность рефлектора, рабочая камера. Для вывода расчетных соотношений используем систему алгебраических уравнений, каждое из которых задает величину результирующего потока относительно одной из поверхностей в рассматриваемой системе тел, при этом все поверхности считаются серыми. Значение результирующего потока $Q_{i_рез}$ для поверхности любого i -го тела в рассматриваемой системе определяется как разность между эффективным излучением данного тела на другие тела и суммой эффективных потоков, падающих на данное тело со стороны других тел

$$Q_{i_рез} = \sum_{k(k \neq i)} Q_{k_эфф} \varphi_{ki} - Q_{i_эфф} \sum_{k(k \neq i)} \varphi_{ik},$$

где $\varphi_{i \rightarrow k}$ и $\varphi_{k \rightarrow i}$ – соответствующие угловые коэффициенты излучения, для которых в пределах рассматриваемой расчетной схемы из n поверхностей действительны соотношения

$$\sum_{i=1}^{i=n} \varphi_{ik} = 1.$$

Поток эффективного излучения i -го тела $Q_{i_эфф}$, равный сумме собственного и отраженного, выражается через потоки собственного Q_{0i} и результирующего $Q_{i_рез}$ излучений следующим соотношением:

$$Q_{i_эфф} = Q_{0i} + R_i Q_{i_рез},$$

где R_i – относительная рефлексивность i -го тела

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i},$$

Q_{0i} – поток собственного излучения абсолютно черного тела при температуре, равной температуре

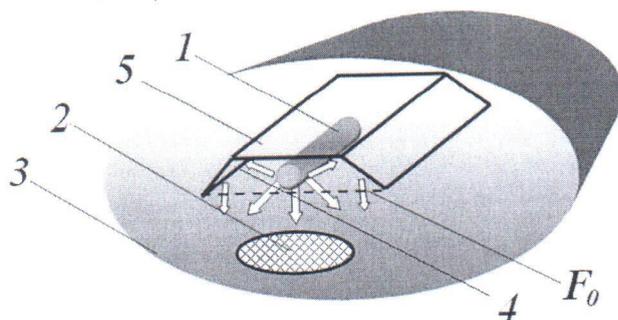


Рисунок 2. Расчетная схема для определения потока излучения с поверхности подложки: 1 – нагреватель, 2 – изделие, 3 – поверхность рабочей камеры, 4 – рабочая поверхность рефлектора, 5 – обратная поверхность рефлектора, F_0 – вспомогательная поверхность

рассматриваемого i -го тела

$$Q_{0i} = \frac{Q_i}{\varepsilon_i} = \frac{E_i}{\varepsilon_i} F_i = E_{0i} F_i,$$

где Q_i , E_i – соответственно интегральный поток и поверхностная плотность собственного излучения i -го тела с поверхностью F_i и коэффициентом излучения ε_i , E_{0i} – поверхностная плотность собственного излучения абсолютно черного тела (а.ч.т.) при температуре T_i i -ой поверхности, определяемая в соответствии с законом Стефана-Больцмана

$$E_{0i} = \sigma_0 T_i^4.$$

С учетом характерных особенностей рассматриваемой расчетной схемы, получена система уравнений для результирующих потоков

$$\begin{cases} Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} = p_H \\ (Q_{12} + Q_{32} + Q_{42}) - (Q_{23} + Q_{24}) = 0 \\ (Q_{13} + Q_{23} + Q_{43} + Q_{53}) - (Q_{32} + Q_{34} + Q_{35}) = Q_{3_рез} \\ (Q_{14} + Q_{24} + Q_{34}) - (Q_{42} + Q_{43}) = Q_{4_рез} \\ Q_{35} - Q_{53} = Q_{5_рез} \end{cases}$$

и система уравнений для оставшегося набора значимых угловых коэффициентов

$$\begin{aligned} \varphi_{12} + \varphi_{13} + \varphi_{14} &= 1 \\ \varphi_{23} + \varphi_{24} &= 1 \\ \varphi_{32} + \varphi_{34} + \varphi_{35} + \varphi_{33} &= 1 \\ \varphi_{42} + \varphi_{43} + \varphi_{44} &= 1 \\ \varphi_{53} &= 1 \end{aligned}$$

Для последующих расчетов были определены значения значимых угловых коэффициентов, после чего описаны основные расчетные варианты в зависимости от характера охлаждения поверхностей рефлектора и рабочей камеры.

Первый вариант - поверхности рабочей камеры и рефлектора охлаждаются водой, что означает постоянство и примерное равенство соответствующих температур $T_3 = T_4 = T_5 = T_{охл} = const$ и при переходе к поверхностным плотностям потоков собственного излучения а.ч.т. при соответствующих температурах $E_{03} = E_{04} = E_{05} = E_{0охл} = \sigma_0 T_{охл}^4$. После преобразований получаем простое выражение для расчета плотности потока собственного излучения E_{02} а.ч.т. при температуре поверхности подложки T_2

$$E_{02} = A^* \frac{p_H}{F_2} + E_{0охл}.$$

Величина A^* зависит от геометрических (φ_{12} , φ_{14} , φ_{24} , φ_{42} , φ_{43} , φ_{32} , φ_{34} , φ_{35}) и теплофизических (R_3 , R_4 , R_5) параметров рассматриваемой системы.

Второй вариант - водоохлаждаемый рефлектор, поверхность рабочей камеры не охлаждается, что означает постоянство и примерное равенство соответствующих температур $T_4 = T_5 = T_{охл} = const$ и, при переходе к поверхностным плотностям потоков собственного излучения а.ч.т. при соответствующих температурах, $E_{04} = E_{05} = E_{0охл} = \sigma_0 T_{охл}^4$. Отсюда выводим соотношение для расчета E_{02}

$$E_{02} = \frac{A_2 p_H}{A_1 F_2} + \left(\frac{A_3 F_4}{A_1 F_2} + \frac{A_4 F_5}{A_1 F_2} \right) E_{0охл} + \frac{A_5 F_3}{A_1 F_2} D_{нар}^*.$$

Величины A_i зависят от геометрических (φ_{12} , φ_{13} , φ_{23} , φ_{42} , φ_{43} , φ_{32} , φ_{34} , φ_{35}) и теплофизических (R_3 , R_4 , R_5) параметров рассматриваемой системы. Значение

фактора наружного охлаждения $D_{нар}$ различно и определяется вариантом охлаждения на наружной поверхности рабочей камеры. В общем случае при определении $D_{нар}$ решена задача теплопередачи от стенки рабочей камеры в окружающую среду. Помимо жидкостного охлаждения с использованием специальных каналов, возможны варианты использования футеровки для теплоизоляции наружной поверхности рабочей камеры, использования экранной изоляции, использования оребрения наружной поверхности.

Третий вариант - поверхности рабочей камеры и рефлектора не охлаждаются водой. Для схемы с размещением рефлектора модуля излучательной системы в рабочей камере это означает, что при достижении максимальной температуры на изделии и выходе на стационарный режим при работающем на полную мощность нагревателе результирующие потоки относительно рабочей $Q_{4_рез}$ и обратной поверхностей рефлектора $Q_{5_рез}$ будут, как и результирующий поток относительно поверхности изделия $Q_{2_рез}$, равны нулю, то есть в данном случае $Q_{2_рез} = Q_{4_рез} = Q_{5_рез} = 0$. В этом случае, по закону сохранения энергии, из очевидного равенства

$$Q_{1_рез} + Q_{2_рез} + Q_{3_рез} + Q_{4_рез} + Q_{5_рез} = 0$$

следует, что $Q_{3_рез} = -Q_{1_рез} = p_n$, откуда получаем расчетное соотношение для E_{02}

$$E_{02} = \frac{A_2 p_n}{A_1 F_2} + \frac{A_3 F_3}{A_1 F_2} D_{нар}^*$$

Полученные решения для трех вариантов позволяют выделить значимые параметры системы и оценить их влияние на значение максимально достижимой температуры на изделии.

При необходимости определения всех результирующих потоков или температур взаимодействующих поверхностей в рассматриваемой системе 5-ти поверхностей решение задачи с использованием алгебраического метода может быть проведено с применением метода Крамера для решения получаемых систем алгебраических уравнений.

В этом случае исходная система уравнений для 5-ти поверхностей в общем виде

$$\begin{aligned} & (1 + (1 - \varphi_{11})R_1)Q_{рез1} - \varphi_{21}R_2Q_{рез2} - \varphi_{31}R_3Q_{рез3} - \varphi_{41}R_4Q_{рез4} - \varphi_{51}R_5Q_{рез5} \\ & = -(1 - \varphi_{11})E_{01}F_1 + \varphi_{21}E_{02}F_2 + \varphi_{31}E_{03}F_3 + \varphi_{41}E_{04}F_4 + \varphi_{51}E_{05}F_5 \\ & - \varphi_{12}R_1Q_{рез1} + (1 + (1 - \varphi_{22})R_2)Q_{рез2} - \varphi_{32}R_3Q_{рез3} - \varphi_{42}R_4Q_{рез4} - \varphi_{52}R_5Q_{рез5} \\ & = \varphi_{12}E_{01}F_1 - (1 - \varphi_{22})E_{02}F_2 + \varphi_{32}E_{03}F_3 + \varphi_{42}R_4Q_{рез4} + \varphi_{52}E_{05}F_5 \\ & - \varphi_{13}R_1Q_{рез1} - \varphi_{23}R_2Q_{рез2} + (1 + (1 - \varphi_{33})R_3)Q_{рез3} - \varphi_{43}R_4Q_{рез4} - \varphi_{53}R_5Q_{рез5} \\ & = \varphi_{13}E_{01}F_1 + \varphi_{23}E_{02}F_2 - (1 - \varphi_{33})E_{03}F_3 + \varphi_{43}E_{04}F_4 + \varphi_{53}E_{05}F_5 \\ & - \varphi_{14}R_1Q_{рез1} - \varphi_{24}R_2Q_{рез2} - \varphi_{34}R_3Q_{рез3} + (1 + (1 - \varphi_{44})R_4)Q_{рез4} - \varphi_{54}R_5Q_{рез5} \\ & = \varphi_{14}E_{01}F_1 + \varphi_{24}E_{02}F_2 + \varphi_{34}E_{03}F_3 - (1 - \varphi_{44})E_{04}F_4 + \varphi_{54}E_{05}F_5 \\ & - \varphi_{15}R_1Q_{рез1} - \varphi_{25}R_2Q_{рез2} - \varphi_{35}R_3Q_{рез3} - \varphi_{45}R_4Q_{рез4} + (1 + (1 - \varphi_{55})R_5)Q_{рез5} \\ & = \varphi_{15}E_{01}F_1 + \varphi_{25}E_{02}F_2 + \varphi_{35}E_{03}F_3 + \varphi_{45}E_{04}F_4 - (1 - \varphi_{55})E_{05}F_5 \end{aligned}$$

Дальнейшие преобразования системы проводятся с учетом специфики поставленной задачи, а именно: рассчитываются значения соответствующих определителей с учетом значений угловых коэффициентов φ_{ij} , коэффициентов излучения ε_i или относительных рефлективностей R_i , известных температур и площадей и определяются неизвестные.

Отдельно следует выделить задачи расчета при зеркальном характере отражения рефлектора. В этом случае направленное отражение предложено

учитывать через соответствующие характеристики зеркального рефлектора, определение и расчет которых для некоторых важных типов рефлекторов были выполнены в Главе 2. Речь здесь идет о коэффициенте использования рефлектора и коэффициенте экранирования отраженного излучения нагревателем.

Такая методика определения тепловых потоков и температур при лучистом теплообмене применима для расчета таких параметров вакуумно-термического оборудования, как требуемая мощность нагревателя и максимальная температура нагрева обрабатываемого изделия в условиях локального распределения температур поверхностей в рабочей камере. При использовании рефлектора учитывается влияние отражения от его активной поверхности как при диффузном, так и при зеркальном характере отражения. Полученные расчетные зависимости позволяют оценить влияние используемой системы теплоизоляции/охлаждения рабочей камеры на расчетные значения требуемой мощности и температуры нагрева.

Глава 4 посвящена экспериментальной проверке полученных математических моделей теплообмена излучением в системе тел, моделирующей модульное лучистое нагревательное устройство.

При реализации существующего технологического процесса магнетронного распыления меди возникла проблема неравномерного расплавления медной мишени при распылении на подложку. Одной из возможных причин такого эффекта может быть недостаток мощности магнетрона. Для гарантированного получения жидкой ванны из твердой мишени и последующего ее распыления необходима некоторая мощность, для определения которой требуется расчет тепловых потоков в рассматриваемом процессе. Такой расчет позволяет сопоставить тепловой эффект процесса с геометрическими параметрами рассматриваемой системы тел для заданной технологической схемы магнетронного распыления, а также с размерами и массой мишени, делая возможной оценку требуемого значения мощности магнетрона в зависимости от формы, размеров и материалов элементов в рабочей камере технологической установки.

Тепловая схема рассматриваемого процесса представлена на Рис. 3.

Мощность, выделяемая в магнетронной распылительной установке, генерирует поток ионов, бомбардирующих медную мишень 1. Полезной мощностью в рамках поставленной задачи будем называть часть полной мощности, обеспечивающей нагрев и, при необходимости, расплавление мишени до жидкого состояния. После разогрева мишени до заданной температуры полезная мощность расходуется на компенсацию потоков тепловых потерь: тепловой поток излучения разогретой мишени на подложку 2 и стенки рабочей камеры 3; тепловой поток теплопроводности от мишени к магнетрону 5 через тигель (держатель мишени) 4 или тепловой поток

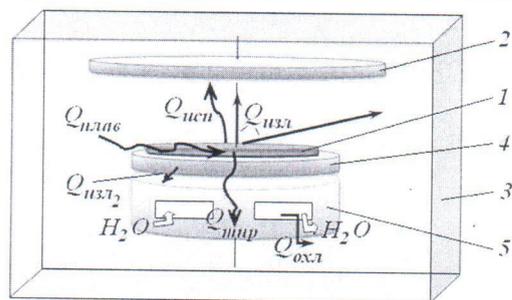


Рисунок 3. Тепловая схема процесса магнетронного распыления медной подложки:

- 1 – мишень,
- 2 – подложка,
- 3 – рабочая камера, 4 – тигель,
- 5 – магнетрон

излучения тигля на поверхность водоохлаждаемого магнетрона; тепловой поток, переносимый испаряемой с мишени медью на подложку и стенки рабочей камеры; тепловой поток, который затрачивается на плавление мишени; тепловой поток, отдаваемый охлаждающей жидкости. Составив уравнение теплового баланса из предположения, что в ходе рассматриваемого процесса система выходит в стационарный режим, определяем полезную составляющую мощности, распределяемую в соответствии с приведенными выше механизмами, и мощность тепловых потерь.

Наибольшую сложность представляет расчет теплового потока излучения с поверхности мишени на подложку и стенки рабочей камеры. Сложность заключается в том, что в данном случае речь идет о лучистом взаимодействии нескольких поверхностей с разными температурами и коэффициентами излучения. Воспользуемся расчетной схемой, представленной на Рис. 4. Расчет проведён алгебраическим методом для двух возможных случаев с использованием метода Крамера. Первый случай - подложкодержатель - отдельный конструктивный элемент, который имеет тепловую развязку со стенками рабочей камеры. Известны T_1 и T_3 , неизвестна T_2 , на подложкодержателе тепловое равновесие $Q_{рез2}=0$. Рассчитав значения соответствующих определителей с учетом значений угловых коэффициентов ϕ_{ij} ,

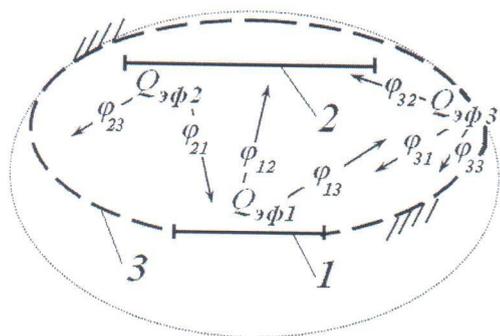


Рисунок 4. Расчетная схема для определения потока излучения с поверхности подложки: 1 – мишень, 2 – подложка, 3 – стенки рабочей камеры

коэффициентов излучения ϵ_i или относительных рефлексивностей R_i , известных температур и площадей T_1, T_3, F_1, F_2, F_3 , определим неизвестные. Второй случай - подложкодержатель встроен в стенку рабочей камеры. Известны T_1 и $T_2=T_3$, $Q_{изл}=Q_{рез1}=-(Q_{рез2}+Q_{рез3})$. Определяем неизвестные, рассчитав значения соответствующих определителей с учетом значений угловых коэффициентов ϕ_{ij} ,

коэффициентов излучения ϵ_i или относительных рефлексивностей R_i , известных температур и площадей $T_1, T_2=T_3, F_1, F_2, F_3$. При определении потока тепловых потерь МРС, а именно теплового потока, отводимого охлаждающей жидкостью, следует говорить о

теплоотводе суммарного теплового потока $Q_{охл} + Q_{тпр}$ или $Q_{охл} + Q_{изл2}$. Эта величина проще всего может быть определена для любого момента времени посредством регистрации при работе установки температуры охлаждающей жидкости на входе в систему охлаждения $t_{охл_н}$ и выходе из нее $t_{охл_к}$, а также расхода $W_{охл}$ охлаждающей жидкости с теплоемкостью $c_{охл}$ по формуле $Q_{охл} + Q_{тпр}$ (или $Q_{охл} + Q_{изл2}$) = $c_{охл} W_{охл} (t_{охл_к} - t_{охл_н})$.

При отсутствии таких данных мощность $Q_{охл}$, выделяемая в виде теплоты при взаимодействии электромагнитного поля и магнетрона, может быть оценена как доля от полной мощности $Q_{охл} = \eta P$. По имеющимся оценкам величина коэффициента $\eta = 0,6 \dots 0,8$. Таким образом, определяем значения всех составляющих тепловых потоков при достижении требуемой температуры на мишени, а также для различных промежуточных значений температуры в

интервале от комнатной до максимальной требуемой, получая зависимости требуемой мощности магнетрона от требуемой температуры на мишени.

$$P(T) = Q_{\text{изл}}(T) + Q_{\text{тпр}}(T) [\text{или } Q_{\text{изл2}}(T)] + Q_{\text{исп}}(T) + Q_{\text{плавл}}(T) + Q_{\text{охл}}(T).$$

Если зафиксировать подаваемую мощность на уровне несколько большем, чем суммарная мощность потерь, генерируемая при достижении требуемой максимальной температуры на изделии T_{max} , предполагая, что магнетрон при включении практически сразу выводится на эту мощность, то можно определить мощность, расходуемую на нагрев мишени и теплоизолированной подложки в процессе изменения температуры во времени как зависимость от разности текущей температуры мишени и начальной ее температуры, равной температуре окружающей среды. Зависимость требуемой мощности от температуры нагрева мишени при различных значениях коэффициента тепловых потерь МРС представлена на Рис. 5, а, составляющих мощности мишени при различных значениях коэффициента тепловых потерь МРС - на Рис. 5, б.

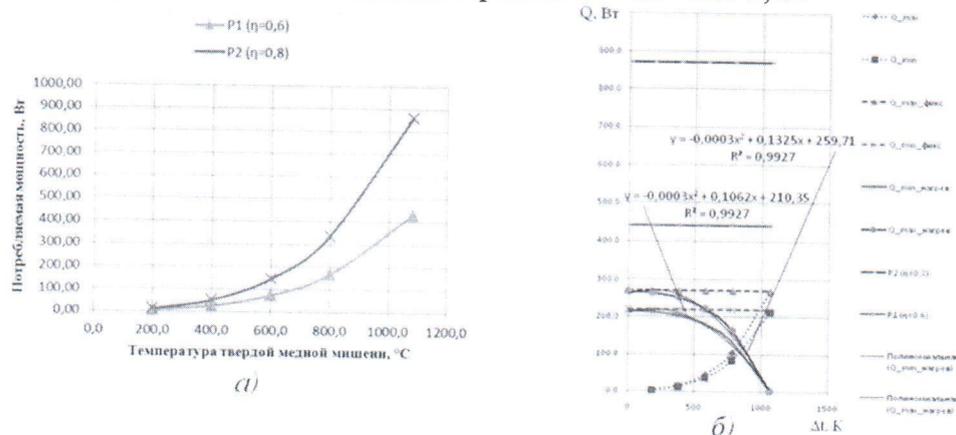


Рисунок 5. Мощностные характеристики при магнетронном распылении мишени: а) зависимость требуемой мощности от максимальной температуры нагрева мишени; б) определение линий тренда для графиков зависимости мощности, расходуемой на нагрев, от величины избыточной температуры мишени

Зависимости изменения температуры мишени от времени представлены на Рис. 6.

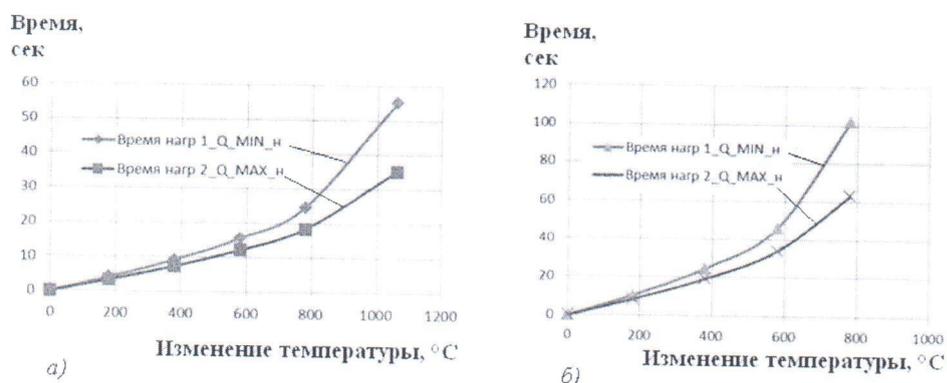


Рисунок 6. Разогрев медной мишени при разной подводимой мощности: а) время нагрева при изменении температуры мишени от исходной до температуры плавления 1084°C (1 – при подводимой мощности 440 Вт и $\eta=0,6$; 2 – при подводимой мощности 870 Вт и $\eta=0,8$); б) время нагрева при изменении температуры мишени от исходной до температуры 800°C (1 – при подводимой мощности 170 Вт и $\eta=0,6$; 2 – при подводимой мощности 340 Вт и $\eta=0,8$)

Изменение температуры теплоизолированной от охлаждаемой стенки рабочей камеры подложки в зависимости от температуры разогрева мишени представлено на Рис. 7.

Температура распыляемой мишени в зависимости от подаваемой на магнетрон мощности была определена экспериментально с целью сравнения экспериментальных данных с расчетными, полученными по представленной в теоретической части методике.

Экспериментальная установка МВТУ-11-1МС представлена на Рис. 8, она включает в себя магнетрон НМСА-52М с использованием магнитов кольцевого и цилиндрического типа. Измерение температуры тигля в зависимости от мощности разряда проводилось при помощи высокотемпературной термопары. При этом тарировка термопары проводилась в низкотемпературной области (температура не выше 550°C) при помощи термопары типа ТХА. Полученные экспериментальные данные представлены в виде зависимостей, которые изображены на Рис. 9, их обработкой получена зависимость потребляемой мощности от температуры мишени, представленная на Рис. 10.

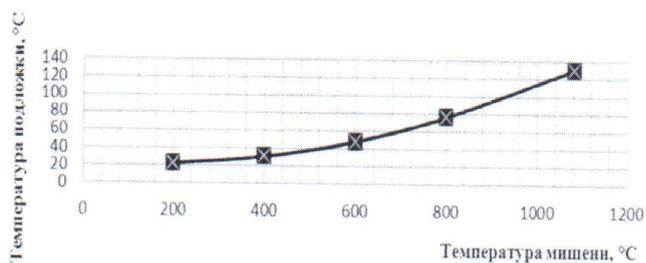
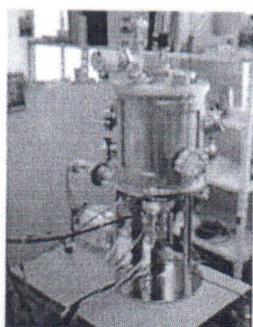
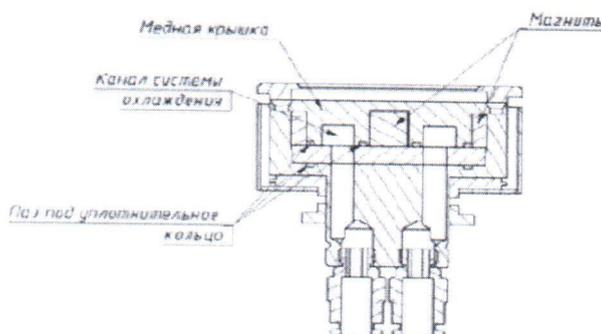


Рисунок 7. Изменение максимальной температуры подложки в зависимости от температуры разогрева мишени



а)



б)

Рисунок 8. Экспериментальная вакуумная установка МВТУ-11-1МС:

а) фотография внешнего вида; б) схема магнетрона НМСА-52М.

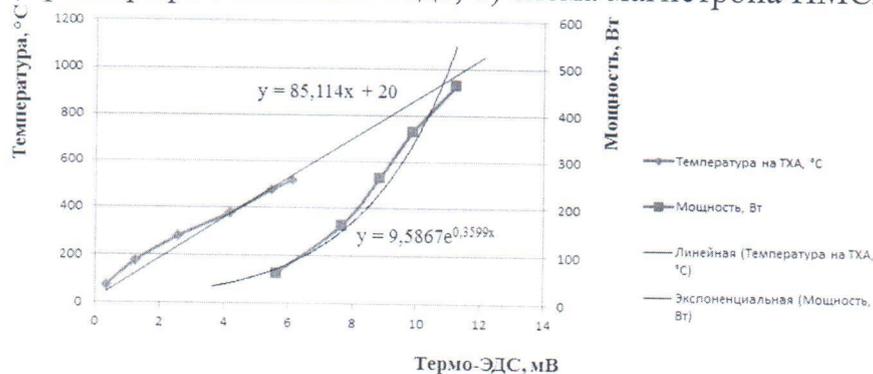


Рисунок 9. Результаты изменения температуры мишени и подаваемой мощности в зависимости от значений термо-ЭДС на высокотемпературной термопаре и соответствующие линии тренда

Расчет времени нагрева подложки выполнен с применением того же подхода, что и для расчета времени нагрева мишени, используя зависимость мощности, расходуемой на нагрев подложки в процессе магнетронного распыления при максимальной температуре мишени.

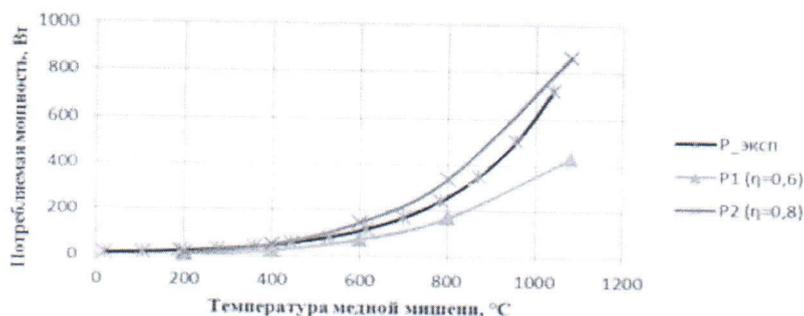


Рисунок 10. Зависимость потребляемой мощности от температуры мишени

Для повышения достоверности результатов исследования были использованы опубликованные данные сотрудников СПГЭТУ (ЛЭТИ) и по описанной выше методике были проведены расчеты магнетрона с горячей мишенью. По расчетам для нагрева твердой медной мишени до температуры плавления 1084°C требуемая полезная мощность магнетрона находится в диапазоне 465-560 Вт. При этом при изменении расстояния между мишенью и подложкой в диапазоне от 40 до 160 мм максимальная температура нагрева подложки падает с 511 до 203°C (Рис. 11, кривая 1).



Рисунок 11. Изменение температуры подложки, °C, при изменении расстояния от мишени до подложки, мм, при температуре твердой мишени:
1 – медной при 1084°C, 2 – титановой при 1668°C

Для титановой мишени в твердом состоянии в области температуры плавления 1668°C расчетная требуемая полезная мощность магнетрона находится в диапазоне 1220-1500 Вт, максимальная температура нагрева подложки при изменении расстояния от мишени в том же диапазоне падает с 712 до 314°C (Рис.11, кривая 2).

Расчеты времени нагрева подложки в зависимости от температуры разогрева мишени и расстояния от мишени для подложки были проведены для расстояния между подложкой и мишенью 120 мм. Для заданной конфигурации системы время нагрева подложки при медной мишени с максимальной температурой 800 и 1000°C представлено на Рис. 12, а, для титановой мишени – на Рис. 12, б. Сравнение экспериментальных данных СПГЭТУ (ЛЭТИ) и результатов расчетов свидетельствует о возможности применения представленной методики для расчета тепловых потоков и температур поверхностей при магнетронном распылении холодных и горячих мишеней,

позволяет рассчитывать мощностные характеристики для получения необходимой температуры на мишени.

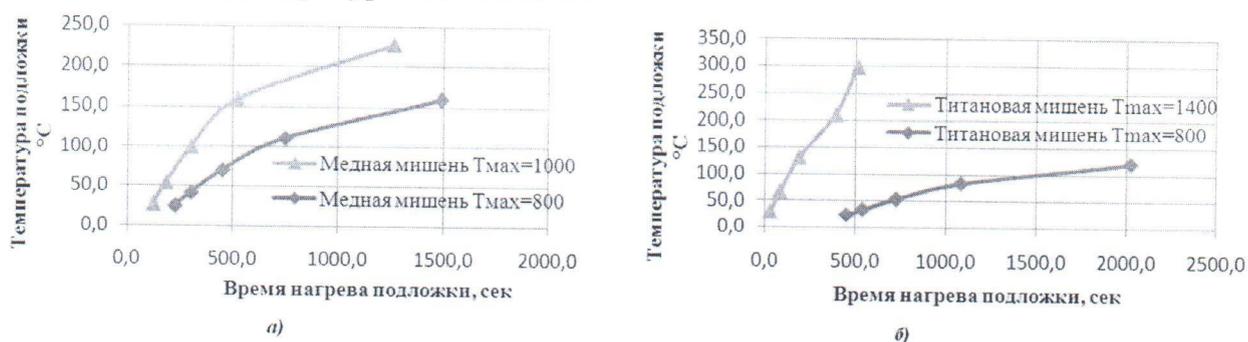


Рисунок 12. Зависимость температуры подложки от времени в системе:

- а) с медной мишенью с максимальной температурой 800 и 1000°C;
- б) с титановой мишенью с максимальной температурой 800 и 1400°C

В **Главе 5** представлена разработанная методика проектирования модульного лучистого нагревательного устройства. В расчетной части формируется блок исходных данных: форма и размеры, расположение в рабочей камере, режим нагрева, начальные и граничные условия. Расчетная схема komponуется из простейших идеальных моделей. Затем рассчитывается требуемая мощность, рассчитываются параметры нагревательного устройства для требуемого режима нагрева. Выбирается тип нагревателя: из высокоомных сплавов; стержневые и фигурные нагреватели из тугоплавких металлов (молибден, тантал, ниобий, вольфрам); графитовые нагреватели; нагревательные модули на основе галогенных ламп накаливания (ГЛН). Возможно использование ТЭНов с герметичными оболочками из коррозионностойких сталей, сваренных со стенками рабочей камеры. При выборе типа нагревателя учитывается состав рабочей среды (смеси остаточных газов в вакууме) и максимальные рабочие температуры. После этого проводится предварительная компоновка рабочей камеры ВТУ с размещением в ней нагревательного модуля и нагреваемого объекта, определяется необходимость использования индивидуального рефлектора с системой охлаждения или без нее, проводится расчет геометрических характеристик и эффективности применения рефлектора после расчета геометрических размеров выбранного типа нагревателя. Затем проводится уточняющий расчет геометрических размеров нагревателя с учетом эффективности рефлектора. При переходе к проектной части работы сначала прорабатываются нагревательные элементы и их контактные зоны. При наличии готовой номенклатуры нагревателей желательна привязка к ближайшему типоразмеру. Затем разрабатывается конструкторская документация на нагревательный модуль, в состав которого входят нагревательный элемент, контактная группа, отражатель, элементы крепления контактной группы к отражателю и нагревательного модуля к стенке рабочей камеры. Разрабатывается система теплоизоляции и охлаждения.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Основные результаты работы: 1) описана и проанализирована необходимая элементная база для компоновки и последующей разработки модульных нагревательных устройств вакуумно-термического оборудования; 2) разработаны критерии и алгоритмы выбора требуемых типов и типоразмеров нагревателей для вакуумно-термического оборудования; 3) предложен метод

расчета лучистого теплообмена для определения требуемых характеристик нагревательных устройств вакуумно-термического оборудования; 4) предложена методика расчета температур мишеней и подложек в зависимости от подводимой мощности при магнетронном распылении, для проверки которой проведены экспериментальные исследования; 5) разработана методика расчета и проектирования нагревательных устройств вакуумно-термического оборудования.

Основные выводы по диссертации:

1. В условиях локального распределения температур в рабочей камере вакуумно-термического оборудования (ВТО) рекомендуется использовать лучистые нагревательные устройства (ЛНУ) модульного типа, разработанные на базе представленного метода расчета и проектирования.

2. Для квалифицированного выбора ЛНУ ВТО с теплоотдачей излучением при их разработке и проектировании возможно использование созданной информационной базы.

3. Для точного определения результирующих тепловых потоков и температуры поверхностей в системах с локальным распределением температур предложенный метод расчета лучистого теплообмена на базе алгебраического способа является удобным инструментом при разработке ЛНУ ВТО.

4. Результаты проведенных экспериментов по магнетронному распылению медных и титановых мишеней подтвердили возможность и целесообразность применения разработанной математической модели лучистого теплообмена для определения температур мишени и подложки в зависимости от подводимой к магнетрону мощности, а также для расчета времени нагрева подложки до максимальной температуры и определения временной зависимости изменения температуры подложки.

Список литературы по тематике работы:

1. Бычков С.П. Нагревательные элементы из сплавов с высоким электрическим сопротивлением для вакуумно-термического оборудования // Справочник. Инженерный журнал. 2015. №9. С. 25-36. (ВАК РФ).

2. Бычков С.П. Нагревательные элементы из тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, тантал, ниобий) для вакуумно-термического оборудования // Справочник. Инженерный журнал. 2016. №7. С. 11-27. (ВАК РФ).

3. Бычков С.П. Применение галогенных ламп накаливания в качестве нагревательных элементов для вакуумно-термического оборудования // Справочник. Инженерный журнал. 2016. №11. С. 9-18. (ВАК РФ).

4. Бычков С.П. Нагревательные элементы из графита для вакуумно-термического оборудования // Справочник. Инженерный журнал. 2016. №8. С. 3-11. (ВАК РФ).

5. Бычков С.П., Жуков В.В. Эффективность применения плоских и трапецевидных отражателей в нагревательных устройствах вакуумно-термических установок // Радиостроение. 2016. (2). С. 1-10.

6. Bychkov S.P. Determination of heat fluxes and surface temperatures during magnetron sputtering with a cold and hot target // 25th International Conference on Vacuum Technique and Technology - IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 387. 2018. 012010. (SCOPUS).