

На правах рукописи

ПЕСТЕРЕВ АНАТОЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМ ИСТОЧНИКОМ
ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ ЗАГОТОВОК
КВАРЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель:

ПЕРВАДЧУК Владимир Павлович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

ЛИВШИЦ Михаил Юрьевич
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Управление и системный
анализ теплоэнергетических и социотех-
нических комплексов» ФГБОУ ВО «Са-
марский государственный технический
университет»

АЛЕЙНИК Артем Сергеевич
кандидат технических наук, доцент фа-
культета «Лазерная фотоника и опто-
электроника» ФГАОУ ВО «Санкт-Пе-
тербургский национальный исследова-
тельский университет информационных

Ведущая организация:

Федеральное государственное автоном-
ное образовательное учреждение выс-
шего образования «Санкт-Петербург-
ский государственный электротехни-
ческий университет «ЛЭТИ» им. В.И.
Ульянова (Ленина)»

Защита состоится «14» июня 2019 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д.212.188.04, на базе ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», по адресу: 614000, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru>).

Автореферат разослан «17» апреля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.188.04
доктор технических наук, доцент

В.И. Фрейман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные волоконно-оптические системы в приборостроении, медицине, системах телеметрии и др. основаны на применении новых типов оптических волокон специального назначения. Специальное оптическое волокно (СОВ) является высокотехнологичным и перспективным продуктом в производстве волоконно-оптических датчиков физических величин, чувствительных элементов для волоконно-оптических гироскопов, лазеров и т.д. В настоящее время активно развиваются несколько технологий парофазного осаждения для изготовления заготовок оптических волокон: PCVD, OVD, VAD, MCVD. Диссертационная работа посвящена совершенствованию технологии модифицированного химического парофазного осаждения MCVD (Modified chemical vapor deposition) в производстве СОВ.

Технология получения кварцевых заготовок методом MCVD, открытая еще в конце 70-х годов прошлого века, постоянно развивается и находит широкое применение в наши дни. Благодаря универсальности и гибкости данной технологии в совокупности с развитием технических средств автоматизации открываются уникальные возможности повышения стабильности параметров заготовок за счет автоматизации процессов изготовления кварцевых заготовок по технологии MCVD. В традиционных методах этого процесса в силу физико-химической специфики парофазного осаждения трудно получить заготовки требуемой геометрической и оптической стабильности.

Фундаментальные физико-химические основы MCVD технологии отражены в трудах таких ученых, как S.R. Nagel, J.B. MacChesney, K.L. Walker, K.S. Park, M. Choi, J.D. Chung, Phillip Bell, Todd Wiggs, Е.М. Дианов, А.С. Бирюков, А.Н. Гурьянов, М.М. Бубнов, Г.А. Иванов. Проблемам оптимального управления распределенными системами посвящены труды Ж.-Л. Лионса, А.Г. Бутковского, А.И. Егорова, Т.К. Сиразетдинова, А.В. Фурсикова, В.П. Первадчука и др. Вопросы автоматизации технологических процессов изготовления заготовки по технологии MCVD представлены в работах G.E. Bodeep, LU Ming-gang, XU Bin, YIN Jian, В.П. Первадчука, Д.Б. Владимировой, И.И. Крюкова.

На сегодняшний день актуальной задачей в области получения кварцевых заготовок по технологии MCVD является обеспечение равномерного слоя осевших реагентов, позволяющего получить требуемые оптические и геометрические характеристики оптических волокон. Эту задачу предлагается решать путем стабилизации температурного поля участка трубы, находящейся в зоне разогрева кислородно-водородной горелки.

Экспериментальные исследования показали, что известные способы управления температурой нагрева кварцевой трубы в MCVD–процессе не обеспечивают оптимальных показателей качества СОВ со сложной оптико-механической структурой. Поэтому разработка автоматизированной системы управления подвижным источником теплового воздействия, позволяющая существенно нивелировать недостатки базовой MCVD–технологии за счет оптимального управления температурным полем с учетом распределённых свойств объекта, является актуальной темой научного исследования.

Объект исследования – автоматизированный технологический процесс производства заготовок оптических волокон по технологии MCVD.

Предмет исследования – модели и алгоритмы оптимального управления подвижным источником теплового воздействия в технологическом процессе производства заготовок оптических волокон по технологии MCVD.

Целью диссертационной работы является повышение качества изготавливаемой по технологии MCVD заготовки на основе применения оптимального управления подвижным источником теплового воздействия.

Задачи исследования:

1. Теоретический анализ и экспериментальные исследования нагрева кварцевой трубы подвижным источником теплового воздействия в производстве заготовок оптических волокон по технологии MCVD;
2. Разработка методов расчёта параметров процесса MCVD по эффективной температуре для систем управления с инфракрасным пирометром;

3. Разработка способа оптимального управления температурным полем на основе разработанной математической модели нагрева кварцевой трубы подвижным источником теплового воздействия;

4. Разработка алгоритма оптимального стабилизирующего управления температурным полем в процессе MCVD.

Научная новизна результатов диссертационного исследования состоит в том, что:

1. Получены новые результаты по оценке влияния параметров подвижного теплового источника на распределение температуры кварцевой трубы, что позволяет снизить погрешности расчета технологических режимов процесса MCVD.

2. Разработана и внедрена оригинальная методика расчета температурных режимов процесса MCVD, отличающаяся учетом эффективной температуры, что позволяет рассчитывать компенсирующие сигналы и тем самым вносить корректировку в систему управления станка MCVD.

3. Предложен способ управления температурным полем объекта управления с учетом его распределенных параметров, что позволяет оптимизировать процесс стабилизации температурного поля.

4. Предложен алгоритм оптимального стабилизирующего управления, отличающийся наличием блока вычислений оптимального процесса, позволяющего стабилизировать температурное поле в режиме реального времени.

Практическая значимость работы

Научные результаты, полученные в данной работе, доведены до практического использования, в том числе в образовательном процессе, реализуемом для бакалавров и магистров направлений подготовки 01.03.02, 01.04.02 «Прикладная математика и информатика». Разработанный программный комплекс предназначен для систем управления с подвижным источником теплового воздействия тепломеханических станков и станков MCVD в производстве оптического волокна. Разработанный программный комплекс включен в систему управления суще-

ствующего станка MCVD и позволяет в режиме реального времени стабилизировать температурное поле путем управления подвижным источником теплового воздействия. Разработанные модели, методы и алгоритмы прошли апробацию и внедрены на предприятии ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

Результаты внедрения и эксплуатации подтвердили работоспособность и эффективность разработанных методов и сократили технологический отход в процессе изготовления изделий по технологии MCVD до 10 % за счет оптимального управления температурным полем.

Методы исследований

Теоретической основой диссертационной работы являются общая теория систем, теория автоматического управления, теория оптимизации, теория планирования эксперимента, теория вычислительных машин и программирования, а также методы математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. *Закономерности* распределения температуры по длине кварцевой трубы при изменении параметров подвижного источника теплового воздействия (п.1 паспорта специальности).
2. *Методика* расчета технологических параметров процесса MCVD по эффективной температуре (п.8 паспорта специальности).
3. *Способ* управления температурным полем, построенный на основе разработанной математической модели оптимального управления нагревом кварцевой трубы подвижным источником теплового воздействия (п.8 паспорта специальности).
4. *Алгоритм* оптимального стабилизирующего управления температурным полем в процессе MCVD (п.15 паспорта специальности).

Область исследования соответствует п. 1 «Автоматизация производства заготовок, изготовления деталей и сборки», п. 8 «Формализованные методы анализа, синтеза, исследования и оптимизация модульных структур систем сбора и

обработки данных в АСУТП, АСУП, АСТПП и др.», п. 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.).» паспорта научной специальности 05.13.06.

Достоверность полученных результатов

Обоснованность научных положений, рекомендаций и выводов, изложенных в работе, не противоречит известным теоретическим положениям и подтверждается данными эксперимента. Достоверность положений и выводов диссертации подтверждена положительными результатами внедрения разработок на предприятии.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы были освещены и подвергались обсуждению в рамках: международной научной конференции Mathematical Methods in Engineering and Technology MMET NW – 2018 (г. Санкт-Петербург, 10 – 14 сентября 2018 г.); всероссийской конференции по волоконной оптике – 2013 (г. Пермь, 16 – 18 октября 2013 г.); всероссийской конференции по волоконной оптике – 2015 (г. Пермь, 7 – 9 октября 2015 г.); всероссийской конференции по волоконной оптике – 2017 (г. Пермь, 3 – 6 октября 2017 г.); научно-технических семинаров Пермского национального исследовательского политехнического университета (2013 – 2018 гг.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из которых 3 публикации в рецензируемых журналах из списка ВАК, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя. В работе [1] представлены разработка и исследование математической модели нагрева кварцевой трубы подвижным источником теплового воздействия. В работе [2] исследовано применение сканирующего пирометра в качестве средства контроля температурного поля в процессе MCVD. В работе [3] автором разработан алгоритм оптимального стабилизирующего управления, отличающийся наличием вычислителя системы дифференциальных

уравнений, моделирующей состояние распределенного объекта управления. В комплекте программного обеспечения [4] автором реализованы основные программные модули алгоритма расчета оптимального управления подвижным источником теплового воздействия и решены вопросы межпрограммного взаимодействия. В работе [5] автором предложен новый способ управления температурным полем, построенный на основе предложенной математической модели. Выполнены техническая адаптация и экспериментальная апробация нового способа управления.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных литературных источников из 105 наименований и 2 приложений. Текст диссертации изложен на 114 страницах, содержит 35 рисунков и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приводится обоснование актуальности работы. Выполнена постановка цели и задач исследования, обозначены научная новизна и значимость результатов. Приведено краткое содержание глав диссертации.

В первой главе проведен анализ существующих автоматизированных систем управления в производстве специального оптического волокна. Основываясь на концепции *CAD-CAM*, показано место исследований данной работы в производстве специальных оптических волокон.

Рассмотрены основные системы управления MCVD станка, оказывающие ключевое влияние на качество конечного изделия. Отмечена сложность ведения процесса MCVD, заключающаяся в высокой чувствительности оптических и геометрических параметров заготовки к отклонениям технологических параметров в течение процесса. Дополнительную сложность накладывает системный эффект, при котором отклонение одних технологических параметров влияет на ряд других параметров, что может привести к потере управляемости объекта управления и недопустимому отклонению оптических и геометрических характери-

стик оптического волокна от требований конструкторской документации. Согласованная работа комплекса технических средств станка MCVD достигается за счёт проектирования, разработки и настройки его ключевых систем управления. На рисунке 1 представлена структурная схема станка MCVD.

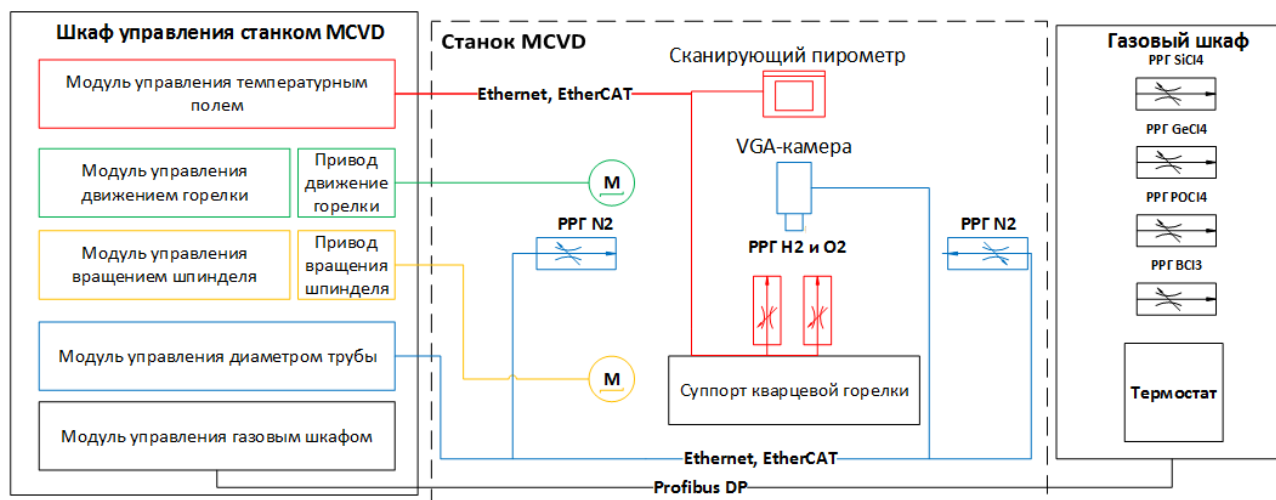


Рисунок 1 – Структурная схема систем управления MCVD-станка:

М – электрический двигатель; PPG – регулятор расхода газа; VGA-камера – компонентный видеоинтерфейс

Отмечается, что однородность оптических и геометрических параметров осажденного слоя по длине заготовки осуществляется за счет программного управления скоростью движения горелки и расходом газов, поступающих внутрь кварцевой трубы, а также стабилизацией температуры в зоне разогрева кварцевой трубы. Причем обзор отечественных и зарубежных литературных источников показал важность поддержания требуемого температурного поля в процессе MCVD, но вместе с тем в литературе нет примеров решения подобных задач. Задачу стабилизации температурного поля в большинстве случаев решают с помощью системы автоматического регулирования, где в контуре обратной связи выступают показания температуры, снятые с помощью точечного инфракрасного пирометра.

Во второй главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований нагрева кварцевой трубы подвижным источником теплового воздействия.

В ходе процесса MCVD опорная кварцевая труба вращается в герметичных муфтах и нагревается до температуры порядка 2000 °Сдвигающимся вдоль продольной оси пламенем кислородно-водородной горелки или индуктором (рисунок 2). Внутрь трубы подаётся смесь кислорода с парами некоторых из следующих веществ: тетрахлориды кремния и германия, бромид бора, оксихлорид фосфора, шестифтористая сера и др. В зоне разогрева парообразные реагенты окисляются. Частицы образовавшихся оксидов размером порядка 0,1 мкм благодаря термофорезу осаждаются на внутренние стенки трубы и сплавляются, образуя слой легированного кварцевого стекла.

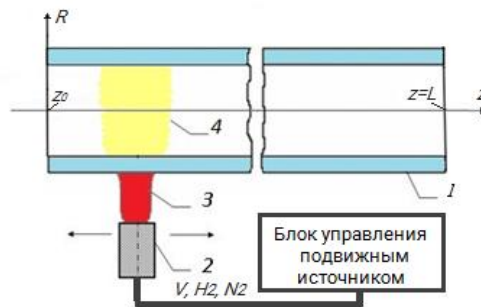


Рисунок 2 – Схематическое изображение процесса MCVD:

1 – кварцевая труба; 2 – подвижный источник (стрелки показывают направление движения); 3 – пламя горелки; 4 – зона реакции

Математическая модель нагрева трубы включает в себя уравнение теплопроводности и функцию подвижного источника. Уравнение теплопроводности получено при следующих предположениях: температурное поле кварцевой трубы осесимметричное (это обеспечивается вращением трубы с постоянной угловой скоростью); теплообмен с внешней окружающей средой и газом, текущим внутри трубы, описывается законом Ньютона; излучение с внешней поверхности трубы подчиняется закону Стефана–Больцмана. Тогда в цилиндрической системе координат уравнение теплопроводности запишется в виде:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (1)$$

Начальное и краевые условия на цилиндрических поверхностях имеют следующий вид:

$$T(z, r, 0) = T_0(z, r), \quad (2)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \alpha_r (T - T_r), \quad (3)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = -\alpha_c (T - T_c) - \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_c^4) + q(z, t), \quad (4)$$

$$T|_{z=0} = T_1(t, r), \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{z=L} = 0, \quad (5)$$

где T – температура кварца; t – время; z, r – соответственно продольная и радиальная координаты; ρ, c, λ – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность кварца соответственно; α_r и α_c – коэффициенты теплообмена с газом и внешней средой; ε – коэффициент черноты; σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана; T_r и T_c – температура газа и внешней среды; r_0 и R – внутренний и внешний радиусы цилиндра; L – длина трубы.

Подвижный источник нагрева – тепловой поток от газовой горелки описывается функцией Гаусса, имеющей вид:

$$q(z, t) = q_{max}(t) \cdot e^{-\left(\frac{z - \int_0^t v(t) dt}{H}\right)^2}, \quad (6)$$

где $v(t)$ – скорость движения горелки, H – параметр формы, $q_{max}(t)$ – функция интенсивности (мощности) горелки.

Идентификация подвижного источника требует определения функции интенсивности $q_{max}(t)$ и параметра H .

Расчетно-экспериментальное определение параметров подвижного источника воздействия. В ходе эксперимента с неподвижной горелкой была использована труба из синтетического кварца со следующими размерами: $L = 500$ мм, $R = 28$ мм, $r_0 = 24$ мм, скорость вращения трубы – 30 об/мин. Расходы газа внутри трубы: водород – 20 л/мин; кислород – 1,2 л/мин, гелий – 1,2 л/мин. Расход газа азота, идущего на обдув пламени, – 2 л/мин. Максимальная температура на поверхности кварцевой трубы не превышала 1800 ± 5 °С. Для измерения температуры на поверхности кварцевой трубы использован сканирующий пирометр фирмы Raytek.

По результатам измерений подобраны искомые q_{max} и H таким образом, что при их подстановке в (6) из решения краевой задачи получали распределение температуры на внешней поверхности трубы, совпадающее с экспериментально полученными значениями. При сравнении результатов моделирования с результатами эксперимента максимальное значение модуля полученной разницы не превышало точности измерения сканирующего пирометра: $\pm 0,5\%$ от измеренной величины.

Для оценки влияния скорости движения горелки на распределение температуры проведены численные и экспериментальные исследования, в которых скорость варьировалась от 70 до 130 мм/мин с шагом 20 мм/мин, при этом максимальная температура на поверхности кварцевой трубы не выходила из диапазона $1800 \pm 5^\circ\text{C}$.

Численные расчеты, проводимые с помощью программных пакетов *COMSOL Multiphysics* и *MatLab*, показали, во-первых, значительное совпадение теоретических и экспериментальных данных и для случая движения источника (рисунок 3), а во-вторых, эти исследования позволили не только количественно оценить влияние различных факторов на тепловые процессы, но и получить

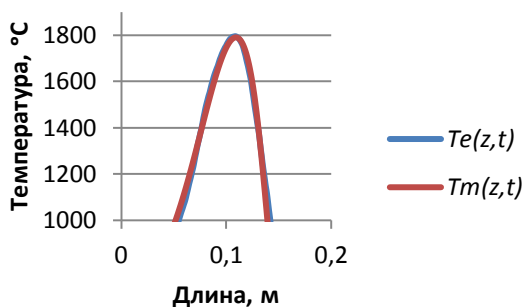


Рисунок 3 – Сравнение результатов моделирования $T_m(z, t)$ и эксперимента $T_e(z, t)$ при $v(t) = 70$ мм/мин

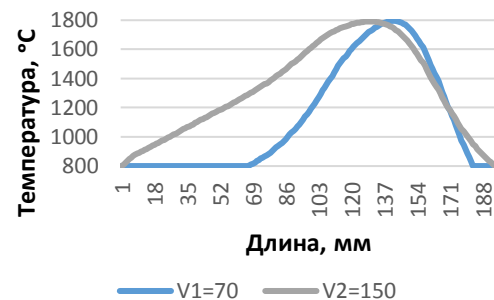


Рисунок 4 – Влияние скорости движения горелки на профиль температуры при $r = R$

ряд важных закономерностей, представляющих практический интерес для технологии MCVD. Речь, кроме прочего, идет и о том, что при неподвижной горелке максимальная температура кварцевой трубы находится на оси симметрии факела пламени. Однако по мере увеличения скорости горелки максимальная температура начинает смещаться от оси симметрии в сторону, противоположную

направлению движения горелки (рисунки 4, 5). Причем, чем больше скорость движения теплового источника, тем больше величина смещения температуры от максимума. При использовании инфракрасного пирометра в качестве средства контроля максимальной температуры T_{max} , в условиях переменной скорости движения горелки, будет накапливаться ошибка (поправка) ΔT . Другими словами, инфракрасный пирометр будет измерять не максимальную температуру, а меньшую по величине температуру, названную в работе эффективной температурой $T_{эф}$.

Указанный факт был принят во внимание при управлении процессом.

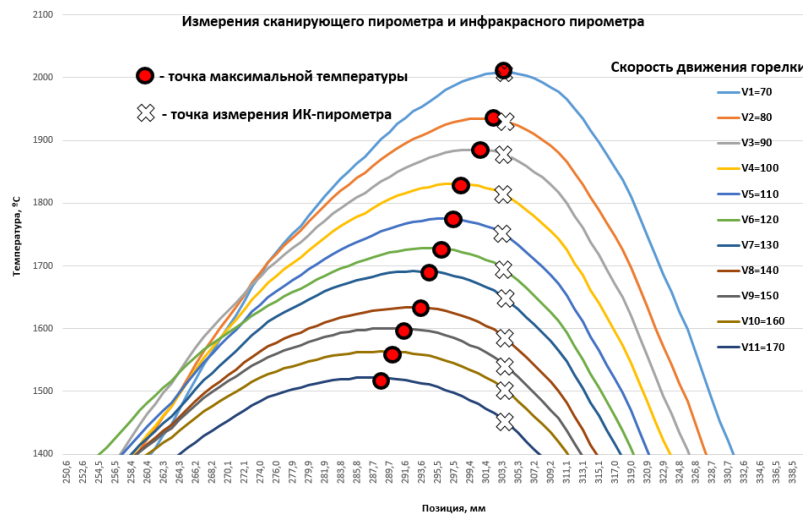


Рисунок 5 – Сравнение показаний сканирующего пирометра и инфракрасного пирометра.

На основании вышеизложенного предложена методика расчета технологических параметров процесса MCVD по эффективной температуре, позволяющая учитывать указанный факт при управлении. Суть методики заключается в том, что для каждого подвижного источника с помощью математической модели и сканирующего пирометра составляют свой паспорт, включающий в себя как характеристики подвижного источника, так и зависимость максимальной температуры на поверхности кварцевой трубы T_{max} от расхода кислородно-водородной смеси и скорости движения горелки для каждого типоразмера трубы. По этим данным вычисляется $T_{эф} = T_{max} - \Delta T$. Значение $T_{эф}$ следует ввести вместо T_{max} в

систему автоматического управления с инфракрасным пирометром в контуре обратной связи.

В третьей главе выполнена постановка задачи оптимального управления температурным полем, а также предложен новый способ управления температурным полем. Конечной целью такого управления является повышение качества изготавливаемой заготовки за счет большей равномерности осаждаемого слоя по длине трубы.

Постановка задачи управления температурным полем

При построении системы оптимального управления подвижным источником теплового воздействия в качестве базовой модели системы с распределенными параметрами рассмотрено нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных следующего вида:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \beta_1 [\alpha_c(T - T_c) + \varepsilon \sigma_0(T^4 - T_c^4) - q(z, t)] - \beta_2 \alpha_r(T - T_r), \quad (7)$$

где β_1 и β_2 — некоторые константы.

Это уравнение получено из краевой задачи (1)–(6) в предположении о независимости температуры от радиуса (что вполне допустимо благодаря малой толщине стенки трубы). Начальное и граничные условия имеют вид уравнений (2)–(5).

Целью управления является поддержание заданного распределения температуры на поверхности цилиндрической трубы. Будем считать, что заранее известны управление $u^*(z, t)$ (тепловой поток на внешней поверхности трубы) и соответствующее ему распределение температуры $T^*(z, t)$ в кварцевой цилиндрической трубе, которое в некотором смысле является наилучшим. Однако реальный процесс $T(z, t)$, $u(z, t)$ будет отличаться от заданного программного $T^*(z, t)$, $u^*(z, t)$ по следующим причинам: а) неточная реализация программного управления; б) неточная реализация начальных и граничных условий; в) неточная информация о физико-механических свойствах материала и т. д., поэтому реальное движение можно представить следующим образом:

$$T(z,t)=T^*(z,t)+\Delta T(z,t); u(z,t)=u^*(z,t)+\Delta u(z,t), \quad (8)$$

где $\Delta T(z,t)$ – отклонения (возмущения) фактического движения от программного; $\Delta u(z,t)$ – отклонения реального управления от программного.

Предполагая, что отклонения $\Delta T(z,t)$ и $\Delta u(z,t)$ достаточно малы, можно получить уравнение возмущенного состояния. Для этого использована процедура линеаризации, которая приводит к следующему линейному уравнению относительно $\Delta T(z,t)$:

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \Delta T}{\partial z} + \beta \Delta T = \gamma \Delta u, \quad (9)$$

где α , β и γ – коэффициенты, полученные при линеаризации уравнения теплообмена.

Это уравнение дополнено начальным условием и граничными условиями первого и второго рода.

В такой постановке целью стабилизирующего управления в общем случае является подбор таких параметров горелки (мощность, скорость, движение), при которых $|\Delta T(z,t)| \rightarrow 0$. В данной работе, как и на практике, в качестве функции управления $\Delta u(z,t)$ выбрана мощность горелки q_{max} .

Функционал, соответствующий такой задаче оптимального управления, имеет вид

$$F(\Delta u, \Delta T) = \int_0^\tau \int_0^L \Delta T^2 dz dt + \sigma \int_0^\tau \int_0^L \Delta u^2 dz dt, \quad (10)$$

где τ – время управления; σ – некоторый параметр, называемый ценой управления.

Из необходимого условия оптимальности $\delta F(\Delta u_0) = 0$ была получена система оптимальности:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \Delta T}{\partial z} + \beta \Delta T = -\frac{\gamma^2 p}{\sigma}, \\ \frac{\partial p}{\partial t} + a \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial p}{\partial z} - \beta p = -\Delta T, \\ \Delta T|_{t=0} = T_0(z), p|_{t=\tau} = 0, \\ \Delta T|_{z=0} = T_1(z), p|_{z=0} = 0, \\ \left. \frac{\partial \Delta T}{\partial z} \right|_{z=L} = 0, \left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=L} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Здесь $p(z,t)$ – произвольная функция, связанная с функцией оптимального управления следующим соотношением: $\Delta u_{onm}(z,t) = \frac{\gamma p}{\sigma}$.

Приближенное решение системы уравнений (11) получено с помощью пакета Matlab в аналитическом виде, т.е. получены уравнения $\Delta T_{onm}(z,t)$ и $\Delta u_{onm}(z,t)$, описывающие оптимальный процесс. На рисунке 6 в качестве примера показано графическое изображение одного из таких процессов. Указанная форма представления решения задачи позволяет использовать эти зависимости в системах управления станка MCVD в реальном режиме времени.

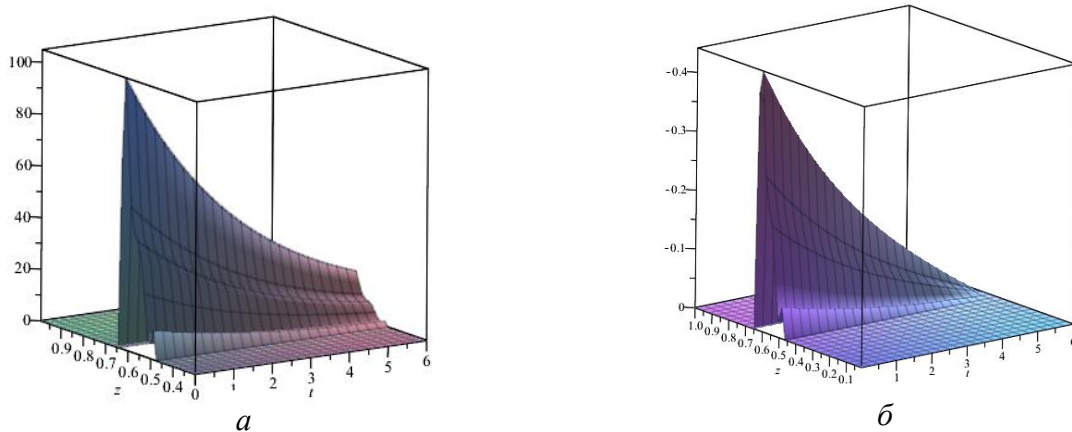


Рисунок 6 – Изменения температуры $\Delta T_{onm}(z,t)(a)$ и мощности горелки $\Delta u_{onm}(z,t)(b)$ при $\tau = 6$ сек.

Принцип действия проектируемой системы управления представлен на рисунке 7. Предположим, что длительность одного прохода горелки в процессе MCVD равна T . Тогда для любого t из $[0, T]$ нам известны распределение температуры $T^*(z,t)$ и соответствующее ему управление $u^*(z,t)$. Пусть контроль температуры сканером осуществляется через одинаковые промежутки времени, равные τ . Тогда решение задачи оптимального стабилизирующего управления будет происходить на временном промежутке $[0, \tau]$. Причем при $t_1=0$ ($t_1 \in [0, \tau]$) нам известны значения: $\Delta T(z, 0) = T(z, 0) - T^*(z, 0)$, где $T(z, 0) = T(z, t)$ – это информация о температуре, полученная с помощью сканирующего пирометра в момент времени t . Принимая $\Delta T(z, 0)$ за начальное условие, а граничные условия

для $\Delta T(z, t)$ первого или второго рода по формулам, полученным из системы оптимальности (11), вычислим $\Delta T_{opt}(z, t)$ и изменение во времени теплового потока (управления) $\Delta u_{opt}(z, t)$. Это управление будет действовать только на временном промежутке $[0, \tau]$, по истечении которого происходит новый замер температуры, вычисление $\Delta T(z, 0)$ и т.д.

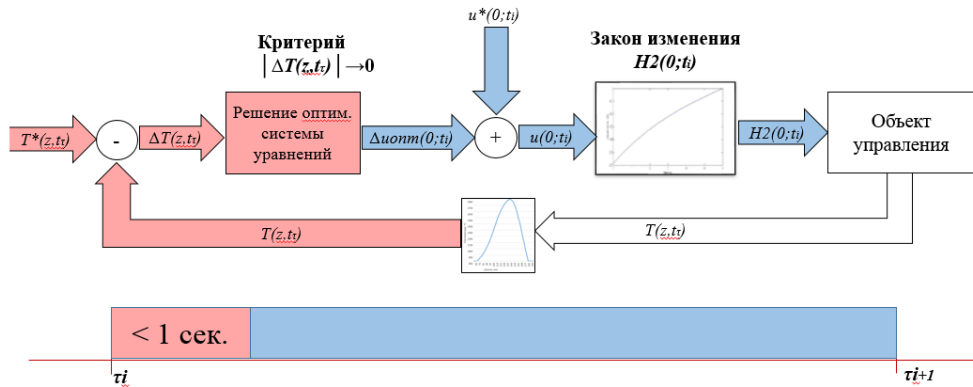


Рисунок 7 – Принцип действия системы управления

В рамках данной работы выполнен анализ устойчивости системы оптимального управления «в малом». При исследовании устойчивости использовали метод Ляпунова, когда по знаку мнимой части корней характеристического уравнения принимается решение об устойчивости системы. В исследуемых режимах система устойчива, что подтверждается практикой.

В четвертой главе показаны состав и место АСУ ТП в процессе изготовления заготовок методом MCVD, представлено описание технического, математического и программного обеспечений АСУ ТП. Основные математические модели, положенные в основу проектируемой системы управления: функция подвижного теплового источника (6); линейное уравнение теплообмена для $\Delta T(z, t)$ (9); оптимизационная система (11). К этим моделям добавлены результаты экспериментальных исследований зависимости мощности источника q_{max} и параметра формы H от расхода водородной смеси.

Таким образом, представленные выше математические методы в совокупности с описанием принципа работы системы управления позволяют сформировать еще одну ключевую составляющую математического обеспечения данной

работы – алгоритм оптимального стабилизирующего управления, рассмотренный в работе. Алгоритм оптимального стабилизирующего управления, представленный на рисунке 8, реализуется на базе управляющего компьютера станка MCVD.

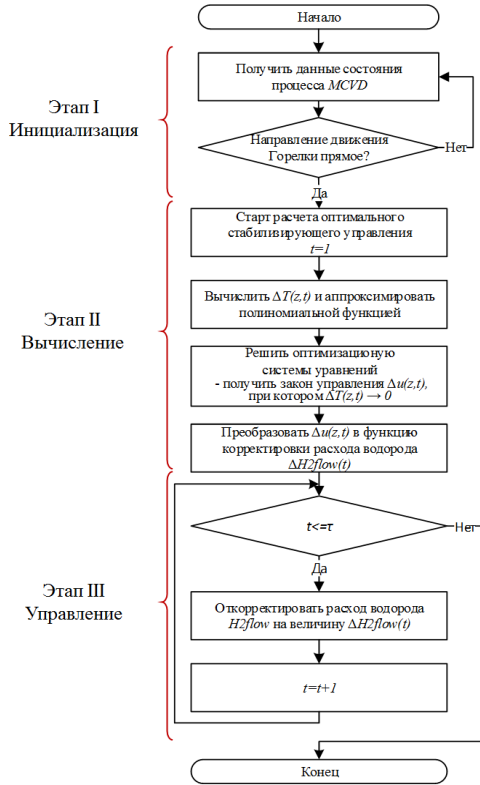


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма оптимального стабилизирующего управления

В процессе выполнения алгоритма оптимального стабилизирующего управления ключевое место отведено блоку вычисления оптимального процесса, который решает три основные задачи:

1. Определение функции $\Delta T(z, 0)$, которая является начальным условием для первого уравнения системы (11). В качестве примера на рисунке 9

сплошной линией изображена кривая, построенная по результатам значений массива $\Delta T(z, 0)$, а пунктирной линией — результат аппроксимации $\Delta T(z, 0)$ полиномиальной функцией степени 6.

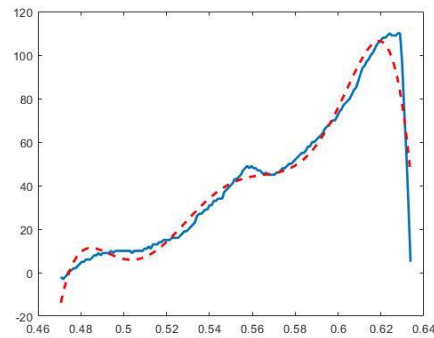


Рисунок 9 – $\Delta T(z, 0)$ и результат аппроксимации

2. С помощью пакета *Matlab* для двух первых уравнений системы (11) находим их общее решение, т.е. функции $\Delta T_{onm}(z, t)$ и $\Delta u_{onm}(z, t)$, содержащие шесть неизвестных произвольных функций.

3. Эти неизвестные функции определяются из решения системы шести алгебраических уравнений, полученных из начальных и граничных условий для функций $\Delta T_{onm}(z, t)$ и $\Delta u_{onm}(z, t)$.

В заключении подведены итоги диссертационного исследования и сделаны выводы по результатам решения поставленных задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи исследования:

1. Получены новые закономерности распределения температуры по длине кварцевой трубы при изменении параметров подвижного источника теплового воздействия, что обеспечивает уменьшение погрешностей в расчетах технологических режимов процесса MCVD.

2. Разработана и внедрена оригинальная методика расчета температурных режимов процесса MCVD, отличающаяся учетом эффективной температуры, что позволяет рассчитывать компенсирующие сигналы и тем самым вносить коррективную в систему управления станка MCVD.

3. Предложен способ управления температурным полем объекта управления с учетом его распределенных параметров, что позволяет оптимизировать процесс стабилизации температурного поля.

4. Предложен алгоритм оптимального стабилизирующего управления, отличающийся наличием блока вычислений оптимального процесса, позволяющего стабилизировать температурное поле в режиме реального времени.

5. Прототип автоматизированной системы внедрен на действующем производстве, что позволило на 10 % снизить технологический отход нагружающих стержней, вызванный неравномерностью по длине геометрических характеристик его сердцевины.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Моделирование нагрева кварцевых труб подвижным источником воздействия для решения задачи управления процессом MCVD / В.П. Первадчук, Д.Б. Владимирова, Д.Н. Дектярев, А.А. Пестерев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 9-2 (51). – С. 76-82.

2. Пестерев, А.А. Сканирующий пирометр в системе управления MCVD процесса / А.А. Пестерев // Автоматизация в промышленности. – 2016. – Т. 08. – С. 49-51.

3. Пестерев, А.А. Алгоритм оптимального управления подвижным источником теплового воздействия / А.А. Пестерев // Вестник ПНИПУ. – 2018. – №3.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

4. Расчет оптимального управления подвижным источником теплового воздействия («Optimal_Control»): свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018661274, РФ / В.П. Первадчук, А.А. Пестерев. Опубл. 04.09.2018.

Другие публикации

5. Optimal Control of Moving Heat Source During Doping of Quartz Preforms for Optical Fiber Production / V.P. Pervadchuk, D.B. Vladimirova, A.N. Kokoulin, A.A. Pesterev // Proceedings of the 2018 IEEE Northwest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMET NW); 10-14 September, 2018. – St. Petersburg, Russia: Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”. – 590 p.

6. Первадчук, В.П. Статистический анализ технологических данных процесса химического парофазного осаждения / В.П. Первадчук, А.Р. Давыдов, А.А. Пестерев // Глобальный научный потенциал. – 2013. – № 3 (24). – С. 70-74.

7. Статистический анализ изменчивости параметров технологического процесса изготовления нагружающих стержней / В.П. Первадчук, И.И. Крюков, А.Р. Давыдов, А.А. Пестерев // Фотон-экспресс. – 2013. – № 6 (110). – С. 267-268.

8. Моделирование нагрева кварцевых труб подвижным источником воздействия / В.П. Первадчук, А.А. Пестерев, Д.В. Владимирова, Д.Н. Дектярев // Фотон-экспресс. – 2015. – № 6 (126). – С. 236-237.

9. Оптимальное управление процессом MCVD / В.П. Первадчук, Д.Б. Владимирова, Д.Н. Дектярев, А.А. Пестерев // Фотон-экспресс. – 2015. – № 6 (126). – С. 163-164.