

**ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
Исаева Темура Фуркатовича  
на тему: «Моделирование процессов напыления многослойных  
покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв»  
по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ**

Представленная диссертационная работа посвящена актуальной научной задаче разработки методов математического моделирования процессов напыления многослойных оптических покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв. Исследование выполнено на стыке физической оптики, вычислительной математики и прикладного программирования и направлено на повышение точности и надёжности технологических процессов формирования оптических покрытий.

**Актуальность темы**

Рассматриваемая диссертационная работа затрагивает круг задач, находящихся на пересечении физической оптики, вычислительной математики и технологий производства оптических покрытий. Рост требований к функциональным характеристикам многослойных покрытий обуславливает необходимость повышения точности управления технологическим процессом их производства. Одним из ключевых факторов, ограничивающих достижимое качество покрытий, является рост ошибок в толщинах напыляемых слоев. При использовании широкополосного оптического контроля эта проблема явно проявляется и негативным образом влияет на результирующие измеряемые спектры получаемого многослойного покрытия. В результате возникает задача разработки моделей и алгоритмов, способных учитывать динамику таких ошибок и обеспечивать устойчивость процедуры контроля. В этой связи выполненное исследование, направленное на создание математического аппарата и вычислительных средств анализа

процессов напыления с учётом реальных факторов, представляется своевременным и востребованным.

### **Степень обоснованности научных положений и выводов.**

Положения, выносимые на защиту, а также сформулированные в диссертации выводы являются обоснованными и логически непротиворечивыми. Их обоснованность обеспечивается корректной постановкой задач, использованием адекватных математических моделей процессов напыления многослойных покрытий и широкополосного оптического контроля, а также применением современных методов вычислительной математики и решения обратных задач. Полученные результаты подтверждены проведёнными вычислительными экспериментами и согласуются с физическими представлениями о процессах напыления многослойных оптических структур. Взаимосвязь теоретических построений, численных методов и программной реализации свидетельствует о целостности и завершённости проведённого исследования.

### **Достоверность полученных результатов.**

Надёжность полученных результатов обеспечивается комплексом факторов: использованием физически адекватных моделей взаимодействия излучения с многослойными структурами, корректной реализацией численных методов, воспроизводимостью результатов в вычислительных экспериментах, использованием экспериментальных данных при анализе отдельных этапов напыления, апробацией разработанных подходов на научных конференциях и опубликованных научных статей в высокорейтинговых научных журналах. Следует отметить, что представленные результаты демонстрируют возможность применять разработанные математические методы к произвольным многослойным оптическим покрытиям, что является важным показателем их практической применимости.

### **Научная новизна**

Новизна диссертационного исследования проявляется в следующих ключевых аспектах. Сформирован комплексный подход к моделированию процессов напыления, учитывающий не только номинальные параметры, но и структуру возникающих ошибок. Разработана модель, позволяющая анализировать динамику накопления погрешностей в процессе формирования покрытия. Предложен эффективный способ генерации и исследования коррелированных ошибок толщин слоёв. Выполнено систематическое исследование влияния корреляции ошибок на итоговые спектральные характеристики. Разработаны алгоритмы восстановления параметров покрытия по спектральным данным с учётом реальных условий измерений. Создан программный инструмент, интегрирующий предложенные методы и обеспечивающий проведение вычислительных экспериментов. В совокупности указанные результаты расширяют методологические возможности математического моделирования в рассматриваемой области.

**Практическая значимость** работы заключается в возможности применения разработанных методов и алгоритмов в реальных технологических процессах производства многослойных оптических покрытий. Предложенные подходы позволяют повысить точность контроля толщин слоёв, учитывать накопленные ошибки в процессе напыления, выбирать оптимальные стратегии управления процессом, проводить вычислительные эксперименты для анализа технологических режимов. Разработанный программный комплекс может быть использован в научных и производственных организациях, занимающихся разработкой и изготовлением оптических покрытий.

#### **Оценка содержания диссертации.**

Диссертационная работа имеет чёткую, логически выстроенную структуру и обладает целостностью изложения. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и одного приложения. Оформление диссертационной работы соответствует установленным требованиям,

изложение материала носит последовательный и научно обоснованный характер.

**Во введении** аргументированно раскрыта актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, приведены положения, выносимые на защиту, а также отражены научная новизна и практическая значимость работы. Структура введения соответствует требованиям к диссертационным исследованиям и задаёт четкую логику дальнейшего изложения.

**Первая глава** носит теоретико-обзорный характер и посвящена последовательному обзору известных результатов в области моделирования многослойных оптических покрытий. В ней структурно изложены математические основы описания распространения электромагнитных волн в многослойных покрытиях, приведены аналитические зависимости для расчёта спектральных характеристик покрытий, а также рассмотрены вопросы корреляции ошибок и эффекта их самокомпенсации. Кроме того, представлен обзор существующих методов решения обратных задач определения толщин слоёв по спектральным характеристикам. Материалы данной главы создают необходимую теоретическую базу для последующих исследований.

**Во второй главе** представлены разработанные автором методы математического моделирования процессов напыления многослойных покрытий. На основе этих методов проведён анализ эффекта кумулятивного накопления ошибок в толщинах слоёв и предложены подходы к его снижению. Существенным результатом является разработка метода высокоэффективного моделирования ошибок напыления, позволяющего учитывать их корреляционную природу и проводить моделирование, приближённое к реальным условиям технологического процесса. Полученные результаты иллюстрируются численными экспериментами и имеют важное значение для практических задач контроля.

**В третьей главе** рассмотрены численные методы решения обратной задачи определения толщин напылённых слоёв по измеренным

спектральным характеристикам. Предложен оригинальный алгоритм решения данной задачи, выполнен его сравнительный анализ с существующими методами, а также исследованы альтернативные подходы, включая методы, основанные на анализе экстремальных значений спектров. Отдельное внимание уделено анализу параметров первого слоя с использованием экспериментальных данных, что повышает прикладную ценность результатов.

**В четвёртой главе** описан разработанный автором комплекс проблемно-ориентированных программ, реализующий предложенный метод математического моделирования коррелированных ошибок напыления. Представленный программный комплекс обеспечивает возможность проведения вычислительных экспериментов, анализа накопления и корреляции ошибок. Наличие программной реализации подтверждает завершённость работы и её ориентированность на практическое применение.

Следует отметить, что главы диссертации логически взаимосвязаны и последовательно развивают основные идеи исследования: от теоретических основ к разработке моделей, затем к численным методам и, наконец, к программной реализации.

В целом содержание диссертации соответствует поставленным целям и задачам, отличается научной строгостью, полнотой и последовательностью изложения. Работа является завершённым исследованием, в котором теоретические, численные и прикладные аспекты объединены в рамках единого научного подхода.

#### **Замечания по работе.**

Несмотря на высокую научную и практическую значимость диссертации, следует отметить ряд замечаний:

1. В алгоритме моделирования процесса напыления шум измерений спектра задаётся как сумма трёх компонент: случайной, флуктуационной и систематической. Однако не обсуждается, насколько данная модель шума

адекватно отражает реальные измерительные системы, в частности возможные спектрально-зависимые и нелинейные искажения.

2. В подходе, направленном на снижения влияния ошибок напыления в функционале невязки используются теоретические толщины ранее напылённых слоёв, что приводит к накоплению ошибки и скачкам значений оцениваемых толщин. Несмотря на то, что предлагается корректировка функционала через переопределение ранее напыленных толщин, в работе не обсуждается влияние этого выбора на устойчивость алгоритма на ранних этапах напыления.

3. При описании метода математического моделирования ошибок напыления заявлено существенное ускорение моделирования (до миллионов реализаций), но при этом количественный анализ сложности алгоритма и его зависимости от числа слоёв и длин волн не приведен.

4. Анализ кумулятивного накопления ошибок проводится на конкретном примере 40-слойного покрытия («горячее зеркало»). При этом обобщение результатов на покрытия с иной структурой или большим числом слоёв носит ограниченный характер.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Исаев Темур Фуркатович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор технических наук,  
профессор кафедры технологий приборостроения  
факультета радиоэлектроники и лазерной техники  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана (национальный  
исследовательский университет)»  
САГАТЕЛЯН Гайк Рафаэлович

Дата: 04.05.2026 г.

Контактные данные:

тел.: 7(499) 263-61-45, e-mail: h\_sagatelelyan@bmstu.ru  
Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:  
05.11.14 – Технология приборостроения, 05.02.08 – Технология  
машиностроения

Адрес места работы:

105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1,  
Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),  
факультет радиоэлектроники и лазерной техники,  
кафедра технологий приборостроения  
Тел.: 7(499) 263-61-45, e-mail: h\_sagatelelyan@bmstu.ru

Подпись профессора кафедры технологий приборостроения  
факультета радиоэлектроники и лазерной техники Московского  
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)

Г.Р. Сагателяна удостоверяю: