

**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**

Диссертационная работа посвящена разработке методов математического моделирования процессов напыления многослойных покрытий с использованием широкополосного оптического контроля толщин слоёв.

**Актуальность темы**

Современные оптические покрытия являются неотъемлемой частью широкого круга высокотехнологичных устройств, включая системы лазерной техники, телекоммуникационные компоненты, оптические сенсоры и элементы микроэлектроники. Качество таких покрытий определяется точностью формирования их спектральных характеристик, что, в свою очередь, требует высокой точности контроля толщин слоёв в процессе напыления. Существенной проблемой является накопление ошибок в процессе напыления многослойных структур, обусловленное как погрешностями измерений, так и особенностями используемых методов контроля. Особенно значимым является корреляция ошибок напыления и связанный с ней эффект самокомпенсации этих ошибок. В этих условиях разработка методов математического моделирования, позволяющих адекватно описывать процессы напыления, анализировать влияние ошибок и разрабатывать эффективные стратегии контроля, является актуальной научной задачей. Диссертационная работа Исаева Темура Фуркатовича в полной мере отвечает указанным требованиям.

**Степень обоснованности научных положений и выводов**

Научные положения, выносимые на защиту, являются обоснованными и подтверждаются результатами проведённого теоретического и вычислительного исследования. Обоснованность обеспечивается корректной математической постановкой задач моделирования процессов напыления оптических покрытий, использованием аппарата физической оптики и теории многослойных сред,

применением методов решения обратных и некорректно поставленных задач, проведением детального численного анализа предложенных алгоритмов, логической связностью полученных результатов.

Следует отметить, что автором последовательно реализован подход, объединяющий методы математического моделирования и вычислительного эксперимента, что соответствует современным тенденциям развития рассматриваемой области.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов диссертации подтверждается соответствием экспериментальных результатов с использованными известными и проверенными физическими моделями, применением адекватных численных методов, проведением вычислительных экспериментов, демонстрирующих устойчивость предложенных подходов, использованием экспериментальных данных при исследовании отдельных аспектов процесса напыления, апробацией результатов на научных конференциях и семинарах, публикациями результатов в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях и патентом на программу для ЭВМ.

Полученные результаты не противоречат известным данным и расширяют существующие представления о моделировании процессов напыления.

### **Научная новизна**

К основным результатам, обладающим научной новизной, относятся следующие пункты. Разработаны оригинальные методы математического моделирования процессов напыления многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоев. Предложены новые алгоритмы определения момента завершения напыления слоя, учитывающие эффект накопления ошибок напыления. Разработан и реализован в виде комплекса программ метод моделирования коррелированных ошибок толщин слоёв, позволяющий учитывать их влияние на спектральные характеристики покрытия. Разработаны новые численные методы решения обратных задач определения толщин слоёв напыленного многослойного покрытия. 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. Разработанные программные комплексы могут быть использованы в научных и производственных организациях, занимающихся разработкой и изготовлением оптических покрытий.

### **Оценка содержания диссертации**

Диссертационная работа характеризуется продуманной структурой и последовательной логикой изложения материала. Она включает введение, четыре главы, заключение и приложение. Объём и оформление работы соответствуют предъявляемым требованиям, а представленный материал обладает достаточной полнотой и научной строгостью.

Во **введении** чётко сформулированы цель и задачи исследования, обоснована актуальность темы, определены научная новизна и практическая значимость работы. Также приведены основные положения, выносимые на защиту, что позволяет сразу определить научный вклад автора и направления проведённого исследования.

**Первая глава** посвящена изложению теоретических основ и анализу существующих подходов в области моделирования многослойных оптических покрытий. В ней рассматриваются вопросы описания спектральных характеристик покрытий, а также анализируются методы учёта ошибок и их влияния на результаты контроля. Представленный материал носит систематизирующий характер и формирует основу для последующих исследований, представленных в диссертационной работе.

Во **второй главе** разработан математический аппарат для моделирования процессов напыления многослойных покрытий с учётом особенностей широкополосного оптического контроля. Особое внимание уделено исследованию механизмов накопления ошибок, эффекту самокомпенсации и их взаимосвязи. Предложенные модели позволяют более точно описывать реальные

технологические процессы и служат основой для разработки и тестирования подходов для повышения качества контроля.

**Третья глава** посвящена разработке и анализу численных методов решения обратных задач, возникающих при определении толщин слоёв по измеренным спектральным характеристикам. Автором предложены оригинальные алгоритмы, а также проведено их сопоставление с существующими подходами. Представленные результаты демонстрируют эффективность разработанных методов и их устойчивость в условиях наличия ошибок.

В **четвёртой главе** приведено описание программного комплекса, реализующего предложенный метод математического моделирования ошибок напыления. Программная реализация позволяет проводить вычислительные эксперименты, исследовать влияние различных факторов на процесс напыления и анализировать эффективность стратегий контроля. Наличие такого комплекса подчёркивает прикладную направленность работы и завершённость проведённого исследования.

Следует отметить, что изложение материала отличается логичностью и взаимосвязанностью: каждая последующая глава опирается на результаты предыдущих, что обеспечивает целостность восприятия работы. Полученные результаты сопровождаются необходимыми иллюстрациями и численными примерами, способствующими их наглядности и интерпретации.

В целом диссертация представляет собой законченное научное исследование, в котором органично сочетаются теоретические разработки, численные методы и программная реализация, что соответствует требованиям, предъявляемым к работам по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

#### **Замечания по работе**

1. Апробация работы (выступление на научных семинарах) проведена внутри одной организации. Для полноценной апробации желательно было выступить на семинарах Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Университета ИТМО, Института автоматизации и электрометрии СО РАН.

2. В (1.6)  $k$  означает волновое число падающей волны в вакууме, в (1.7) -  $k$  означает волновое число падающей волны. Это разные обозначения волновых чисел?
3. Что дает минимизация функционала (1.36)? Для постановки обратной задачи необходимо сформулировать прямую задачу.
4. Какое число параметров определяется в численных расчетах и по какому набору данных в каждой главе?
5. Математическая модель в главе 1 сводится к закону Снеллиуса. Расчет характеристик сводится к рекуррентной формуле перехода со слоя на слой с матрицами  $2 \times 2$ , коэффициенты которых выписываются в явном виде. Нет четкого обоснования новизны алгоритма.
6. Что можно сказать о сходимости приведенных алгоритмов по функционалу и скорости сильной сходимости?
7. Исследовался ли вопрос единственности и условной устойчивости решения рассматриваемых обратных задач? Какие теоретические результаты уже получены в мире по данному вопросу?

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 работы соответствует специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (по физико-математическим наукам), а также критериям, установленным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении учёных 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 учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник лаборатории  
прикладных обратных задач Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
Институт математики им. С. Л. Соболева  
Сибирского отделения Российской академии наук  
ШИШЛЕНИН Максим Александрович

Дата: 04.05.2026 г.

Контактные данные:

тел.: 7(383) 329-76-19, e-mail: maxim.shishlenin@math.nsc.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.01.07 – Вычислительная математика

Адрес места работы:

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 4,  
Институт математики им. С. Л. Соболева  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
лаборатория прикладных обратных задач  
тел.: 7(383) 329-76-19, e-mail: maxim.shishlenin@math.nsc.ru

Подпись главного научного сотрудника  
лаборатории прикладных обратных задач  
Института математики им. С. Л. Соболева  
Сибирского отделения Российской академии наук

М.А. Шишленина удостоверяю:

Ученый секретарь Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН

к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ Н.А. Даурцева