

На правах рукописи



МИХЕЕВ Владислав Александрович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА НОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ НА СТАДИИ  
РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена на кафедре метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

**Научный руководитель:**

**Сулаберидзе Владимир Шалвович**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, академик Метрологической академии Российской Федерации

**Официальные оппоненты:**

**Киселевич Валерий Павлович**

доктор технических наук,  
заместитель генерального директора – генерального конструктора  
АО «Концерн «Моринформсистема – Агат»

**Фуксов Виктор Маркович**

кандидат технических наук,  
заместитель руководителя лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области термометрии ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

**Ведущая организация:**

ОАО «Авангард», 195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., 72

Защита состоится «07» июня 2018 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.04 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С авторефератом и текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guar.ru>.

Автореферат разослан «20» апреля 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.233.04,  
кандидат технических наук, доцент



Фролова Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Согласно директивным документам Правительства Российской Федерации — «Стратегии инновационного развития РФ на период до 2020 года», утверждённой Распоряжением Правительства Российской Федерации от 08 декабря 2011 г. № 2227-р, «Прогнозу научно-технологического развития РФ: 2030», «Прогнозу научно-технологического развития РФ: 2030. Новые материалы и нанотехнологии» и Постановлению Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 328 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» — одним из приоритетных направлений технологического развития страны является «...широкое внедрение материалов со специальными свойствами (в первую очередь, композиционных материалов)», так называемых, функциональных материалов (ФМ).

Государственная политика в сфере поддержки инновационных технологий (Федеральные законы: «О науке и государственной научно-технической политике» от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ и «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам создания бюджетными научными и образовательными учреждениями хозяйственных обществ в целях практического применения (внедрения) результатов интеллектуальной деятельности» от 02 августа 2009 г. № 217-ФЗ, а также постановление Правительства РФ «О государственной поддержке развития инновационной инфраструктуры в федеральных образовательных учреждениях высшего профессионального образования» от 09 апреля 2010 г. № 219) — предполагает стимулирование сотрудничества малых инновационных предприятий (МИП) и образовательных учреждений высшего образования в области научно-технического сопровождения разработок путем оказания инжиниринговых услуг на стадиях разработки и организации производства новой продукции, в том числе и новых ФМ.

Обеспечивая научно-техническое сопровождение разработок в современных условиях, образовательное учреждение должно учитывать ограниченные финансовые и технические возможности МИП и стремиться как к оптимизации затрат, так и к повышению результативности исследований.

С учётом вышесказанного, в настоящей диссертации рассмотрен комплекс вопросов, касающихся, с одной стороны, процессам разработки и исследования одного из ключевых элементов изделий электро- и микроволновой техники — теплопроводящих функциональных материалов (ТФМ), предназначенных для использования в качестве диэлектрических теплопроводящих покрытий, а с другой стороны, — оптимизации и повышения результативности исследований при разработке новых ТФМ с применением инструментов обеспечения качества.

Всё большая миниатюризация разрабатываемых электронных изделий, увеличивающая плотность электрического монтажа компонентов приводит к увеличению плотности тепловыделения и, как следствие, к перегреву их элементов. Несоблюдение тепловых режимов в электронных изделиях приводит к росту частоты отказов радиоэлементов, что влечет за собой выход из строя системы в целом.

Одним из способов регулирования теплового режима в изделиях является нанесение на их поверхность теплопроводящего покрытия, которое, кроме отвода тепла, выполняет функции электрической изоляции, защиты от внешней среды, дополнительной механической фиксации и демпфирования при механических воздействиях (вибрация, ускорение, удар).

Предлагаемые сегодня на рынке теплопроводящие материалы не в полной мере удовлетворяют потребностям приборостроительных предприятий по ряду причин, главными из которых являются их импортное происхождение и высокая стоимость при неудовлетворительных значениях характеристик. Именно эти обстоятельства и дают основание считать разработку новых ТФМ актуальной задачей, в первую очередь, для отечественной электронной, приборостроительной и химической промышленности.

В диссертации разработаны и исследованы новые двух- и трёхкомпонентные ТФМ на основе полимерных связующих из силикона, полиуретана и эпоксидной смолы с дисперсными наполнителями из порошков  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{BN}$  и их комбинаций. А также, как отмечено выше, рассмотрены вопросы оптимизации и повышения результативности исследований при разработке новых ТФМ с применением инструментов обеспечения качества. А именно: квалиметрического анализа на основе метода ранжирования показателей качества, анализа эффективности принятой стратегии на основе распределения Парето «результат/затраты», планирования и статистического анализа экспериментальных данных, моделирования основного показателя качества ФМ — теплопроводности в зависимости от состава композиции и объёмного содержания дисперсных наполнителей, наряду с применением «инструментов обеспечения качества» в процессе производства вновь разработанных материалов.

**Степень проработанности проблемы.** Существенный вклад в исследование теплопроводности композиционных материалов с различными наполнителями и разработку расчётных моделей для её оценки внесли отечественные и зарубежные ученые: Ю.К. Годовский, Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк, В.С. Платунов, А.Ф. Чудновский, А. Миснар и др. Тем не менее, в связи с появлением новых видов связующих и дисперсных наполнителей, требуются как дальнейшие экспериментальные исследования, так и теоретические разработки моделей для прогнозирования теплопроводности двух- и трёхкомпонентных композиций.

Остаются актуальными и вопросы повышения результативности исследований на стадии разработки, включая метрологическое обеспечение исследований и контроль качества новых ТФМ, создаваемых в МИП. Для решения этих вопросов применяют методы инжиниринга качества (QFD-анализ, контрольные карты Шухарта и др.), квалиметрию, разработанные такими ведущими специалистами в области управления качеством как: Ю.П. Адлер, Г.Г. Азгальдов, Б.В. Бойцов, А.Г. Варжапетян, А.С. Васильев, А.В. Гличев, Э. Деминг, З.Н. Крапивенский, Ю.П. Кураченко, К. Исикава, В. Парето, Е.Г. Семенова, А.А. Суббето, Г. Тагути, Д.Н. Хамханова, У. Шухарт и др.

**Целью диссертационной работы** является повышение результативности процесса разработки новых ТФМ, используемых в качестве теплопроводящих диэлектрических покрытий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать современный технический уровень развития ТФМ на основе развертывания функции качества (QFD-анализ) и патентного исследования;
2. Разработать квалиметрическую модель оценки показателей качества и метрологического обеспечения ТФМ на стадии их разработки и производства;
3. Провести экспериментальные исследования и систематизацию результатов по теплопроводности вновь разработанных образцов ТФМ на основе полимерных связующих и дисперсных наполнителей;
4. Разработать расчётные модели, позволяющие проводить оценку теплопроводности ТФМ с требуемой точностью.

**Объектом исследования** являются теплопроводящие диэлектрические ФМ, предназначенные для отвода тепла в изделиях приборостроения и электроники.

**Предметом исследования** являются методы повышения результативности научно-технического сопровождения процесса разработки и метрологического обеспечения исследований и контроля качества ФМ для теплопроводящих покрытий на стадии разработки и производства.

**Методами исследования** при решении поставленных задач являются: статистические методы анализа экспериментальной информации, включая метод множественной регрессии; квалиметрический анализ методом ранжирования; метод анализа эффективности исследований на основе диаграммы Парето; метод развертывания функции качества (QFD–анализ); причинно-следственная диаграмма Исикавы; контрольные карты Шухарта; методы исследований теплофизических характеристик ТФМ и патентное исследование.

**Область исследования** соответствует пункту 2 «Стандартизация, метрологическое обеспечение, управление качеством и сертификация»; пункту 3 «Методы стандартизации и менеджмента (контроль, управление, обеспечение, повышение, планирование) качества объектов и услуг на различных стадиях жизненного цикла продукции» и пункту 4 «Квалиметрические методы оценки качества объектов, стандартизации и процессов управления качеством» паспорта специальности 05.02.23 – «Стандартизация и управление качеством продукции».

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработана научно обоснованная методика повышения результативности научно-технического сопровождения процесса разработки ТФМ, включая метрологическое обеспечение исследований и контроля качества, основанная на квалиметрической оценке показателей качества методом экспертного ранжирования, распределении Парето «результат/затраты», методах повышения точности и достоверности результатов экспериментальных исследований теплопроводности ТФМ и применении контрольных карт Шухарта;

2. Получены новые экспериментальные результаты по теплопроводности для вновь разработанных двух- и трёхкомпонентных ТФМ на основе полимерных связующих в зависимости от температуры и объёмного содержания дисперсного наполнителя (порошки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$  и  $\text{BN}$ );

3. Предложены расчётные модели и методика расчёта эффективной теплопроводности двух- и трёхкомпонентных ТФМ, отличающиеся от известных формул тем, что они основаны на расчётно-экспериментальном методе статистического моделирования и модифицированной формуле Бургера, адекватность которых подтверждена экспериментально.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке научно обоснованной методики повышения результативности научно-технического сопровождения процесса разработки новых ТФМ для теплопроводящих диэлектрических покрытий, включая метрологическое обеспечение исследований и контроля качества, а также новых расчётно-экспериментальных моделей теплопроводности ТФМ на основе полимерных связующих и дисперсных наполнителей.

**Практическая значимость результатов работы:**

1. Предложена практичная методика повышения результативности научно-технического сопровождения процесса разработки новых ТФМ для теплопроводящих диэлектрических

покрытий на основе квалиметрической модели показателей качества методом экспертного ранжирования и метрологического обеспечения исследований и контроля качества, удобная для применения на МИП.

2. Разработаны расчётные модели эффективной теплопроводности ТФМ, позволяющие предварительно подобрать вид и объёмное содержание дисперсного наполнителя для достижения требуемых значений теплопроводности материалов на основе полимерных связующих (силикон, полиуретан и эпоксидная смола) и дисперсных наполнителей (порошки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$  и  $\text{BN}$ ).

3. Разработаны новые ТФМ, предназначенные для диэлектрических теплопроводящих покрытий, обеспечивающие требуемые значения показателей качества (патент РФ на изобретение RU2645533C1, заявки на выдачу патента РФ на изобретение № 2017100478 от 09.01.2017 г, № 2016140443 от 13.10.2016 г. и № 2016140444 от 13.10.2016 г.).

4. Разработан и внедрён стандарт организации в ООО «СТОЛП» по повышению качества ФМ на стадии производства, основанный на применении контрольных карт Шухарта, позволяющий повысить качество ФМ за счёт получения стабильного и управляемого процесса их производства.

5. Полученные в диссертации результаты по теплопроводности материалов позволили выиграть конкурс на грант в поддержку дальнейшего развития и реализацию проекта «Разработка, изготовление и исследование опытных образцов теплопроводящих компаундов с повышенным уровнем диэлектрических и теплопроводящих характеристик» (Договор № 2157ГС1/35317 от 18.09.2017 г. с Фондом развития инноваций).

#### **Основные результаты и положения, выносимые на защиту:**

1. Методика повышения результативности научно-технического сопровождения разработок ТФМ для теплопроводящих диэлектрических покрытий, основанная на квалиметрической модели оценки показателей качества и метрологическом обеспечении исследований и контроля качества.

2. Экспериментальные результаты по теплопроводности двух- и трёхкомпонентных ТФМ на основе полимерных связующих (силикон, полиуретан и эпоксидная смола) в зависимости от температуры и объёмного содержания дисперсного наполнителя (порошки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$  и  $\text{BN}$ );

3. Расчётные модели эффективной теплопроводности новых двух- и трёхкомпонентных композиций, основанные на расчётно-экспериментальном методе статистического моделирования и модифицированной формуле Бургера, адекватность которых подтверждена экспериментально.

**Достоверность научных результатов**, содержащихся в диссертации, обеспечивается корректностью применения методов статистической обработки результатов и методов инжиниринга качества, использованием поверенных (калиброванных) средств измерений для проведения экспериментов, учётом современных научных достижений в области измерений теплофизических свойств веществ, в области «инструментов управления качеством», а также подтверждается согласованностью экспериментальных и расчётных данных, положительными результатами применения метода моделирования теплопроводности на практике, получением новых ТФМ, превосходящих известные аналоги по теплопроводности, обсуждением основных результатов исследований на научно-практических конференциях, а также их публикациями в ведущих научных рецензируемых изданиях.

**Личный вклад автора** в материалы, изложенные в диссертации, состоит в разработке методики повышения результативности научно-технического сопровождения процесса разработки новых ТФМ; проведении экспериментальных и расчётных исследований, наряду с анализом результатов теплопроводности вновь разработанных ТФМ; участии в апробации и внедрении результатов исследования.

**Внедрение результатов.** Результаты диссертации внедрены в ООО «СТОЛП», ООО «Функциональные материалы» и в учебный процесс ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на восьми научно-технических и научно-практических конференциях. В том числе X-й Международной конференции по проблемам термометрии «Температура-2015» (ФГУП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург, 2015 г.); XI-й Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» (БГТУ «ВОЕНМЕХ», Санкт-Петербург, 2015 г.); XI-й научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» (БГТУ «ВОЕНМЕХ», Санкт-Петербург, 2015 г.); III-й технической конференции «Производство, разработка, испытания изделий. Внедрение инновационных технологий. Состояние и направление развития» (ЗАО «НПЦ «Аквамарин», Санкт-Петербург, 2014 г.); IX-й Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные основы баллистического проектирования» (БГТУ «ВОЕНМЕХ», Санкт-Петербург, 2014 г.); Научной конференции «Традиции и инновации», посвященной 187-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (СПбГТИ, Санкт-Петербург, 2015 г.); Осеннем финале УМНИК 2015 «Научная конференция молодых инноваторов» (СПбПУ, Санкт-Петербург, 2015 г.); IV-й технической конференции «Производство, разработка, испытания изделий. Внедрение инновационных технологий. Состояние и направление развития» (ЗАО «НПЦ «Аквамарин», Санкт-Петербург, 2016 г.)

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 23 научные работы, в том числе 7 публикаций в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 1 патент РФ на изобретение, 3 заявки на выдачу патента РФ на изобретение.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 146 наименований и 4 приложений. Основная часть работы изложена на 156 страницах, содержит 83 рисунка и 43 таблицы. Общий объём диссертации с учетом приложений составляет 173 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи для её решения, определены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации, внедрении результатов работы и методах исследования.

**В первом разделе** проанализированы актуальность разработки новых теплопроводящих функциональных материалов (ТФМ) и их современный технический уровень. С помощью причинно-следственной диаграммы Исикавы определены основные факторы, влияющие на качество ТФМ. На основе развертывания функции качества (QFD-анализ) выявлены ожидания

потребителя и значения характеристик, необходимых для их достижения. Установлено, что основными характеристиками ТФМ, которые следует улучшать в первую очередь, являются: теплофизические и физико-механические характеристики, которые в наибольшей степени и определяют область применения, рассматриваемого в настоящей работе материала.

По результатам развертывания функции качества и определения современного технического уровня ТФМ выявлена потребность в материалах с теплопроводностью более 1 Вт/(м·К). При этом материал должен иметь оптимальные физико-механические и технологические значения характеристики для обеспечения возможности использования в изделиях с профилем любой сложности и при различных условиях эксплуатации.

В диссертации для исследования в качестве полимерных связующих выбраны: силиконовый каучук СКТН марки А ГОСТ 13835-73, полиуретановая вязкотекучая композиция СУРЭЛ-7 и СУРЭЛ-27 ТУ 2253-027-13175942-2011, эпоксидная смола марки ЭД-20 ГОСТ 10587-84. Такой выбор обусловлен комплексом свойств, присущий указанным материалам, а именно: технологичность, эластичность, высокие диэлектрические и физико-механические свойства и др. В качестве наполнителей выбраны минеральные теплопроводные диэлектрические порошки  $\text{SiO}_2$ , SiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , AlN и BN, по размеру частиц  $d$  относящиеся к крупно- ( $d > 40$  мкм) и средне дисперсным ( $10 < d < 40$  мкм). Поскольку стоимость наполнителя существенно влияет на стоимость готового продукта в целом, особенно при объёмном содержании более 50 %, то выбор наполнителей определяется с учётом достижения требуемой теплопроводности ТФМ при минимальном содержании наполнителя.

Стоимостной анализ высокодисперсных порошков различных производителей, показал, что их цена выше, чем крупнодисперсных в несколько раз. Например, для порошков AlN (белый) цена возрастает от 1000 до 9500 руб. за килограмм. Применение высокодисперсных наполнителей может привести к повышению как теплофизических, так и физико-механических характеристик ТФМ, но при этом существенно увеличивается стоимость конечного продукта.

В целях повышения качества ТФМ и достижения воспроизводимости и стабильности технологического процесса производства необходимо учитывать и такие факторы, как калибровка измерительного оборудования, метод измерения характеристик ТФМ, подготовка наполнителя к смешению, агрегаты частиц порошка наполнителя, гранулометрический состав наполнителя, соотношение компонент, контроль стабильности технологического процесса, чистота производственного помещения.

**Второй раздел** посвящен разработке методики повышения результативности научно-технического сопровождения процесса разработки при взаимодействии малых инновационных предприятий (МИП) с образовательными учреждениями (ОУ) и метрологическому обеспечению контроля качества ТФМ.

При разработке ТФМ возникает необходимость их исследования на предмет достижения требуемых значений характеристик. Перечень таких характеристик достаточно велик, что значительно усложняет исследования и приводит к увеличению затрат на их проведение, как временных, так и материальных. Это обстоятельство, в свою очередь, замедляет процесс выхода на стадию производства.

В настоящей работе показано, что рассматриваемые ТФМ описываются 26 показателями качества. В связи с этим возникает необходимость в оптимизации затрат. С этой целью для описания ТФМ, подлежащих разработке, целесообразно использовать не полный объём показателей качества, а лишь основные показатели, которых вполне достаточно для принятия решения о применимости материала в конкретном изделии. Для этого предлагается с помощью



квалиметрической оценки выявить наиболее важные показатели качества ТФМ для их дальнейшего исследования. Такой подход позволяет повысить, как показатель экономической эффективности — соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами — так и результативность научно-технического сопровождения разработки ТФМ.

В результате квалиметрической оценки, выполненной методом экспертного ранжирования, сформирована таблица значимости различных групп показателей качества ТФМ (таблица 1).

Таблица 1 – Ранжирование групп свойств материала по значимости

Номер группы	Группа показателей	Весовой коэффициент, отн. ед.
1	Назначения (функциональные)	0,638
2	Физико-механические	0,174
3	Технологичности	0,105
4	Безопасности	0,043
5	Патентно правовые	0,017
6	Сохраняемости	0,014
7	Транспортабельности	0,009

Для оценки степени согласованности оценок экспертов рассчитан коэффициент конкордации Кендалла  $W$ , равный  $W = 0,93$ , что свидетельствует о высокой степени согласованности оценок экспертов.

Проверка нулевой гипотезы о том, что оценки экспертов не согласуются, друг с другом ( $W=0$ ) при альтернативной гипотезе, что оценки экспертов согласуются ( $W \neq 0$ ), проведена с помощью критерия согласия  $\chi^2$  Пирсона. Расчётное значение критерия согласия  $\chi^2$  Пирсона равно  $\chi^2_{\text{расч}} = 162,5$ , а его табличное значение при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы 26 равно  $\chi^2_{0,05} = 37,65$ . Поскольку  $\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{0,05}$ , то нулевая гипотеза о несогласованности оценок экспертов отклоняется.

Согласно данным таблицы 1 видно, что наиболее высоким весовым коэффициентом обладает группа функциональных показателей (группа № 1). На основе данных таблицы 1 построена функция нарастающей полноты достижения результата в зависимости от количества исследуемых характеристик (рисунок 1).

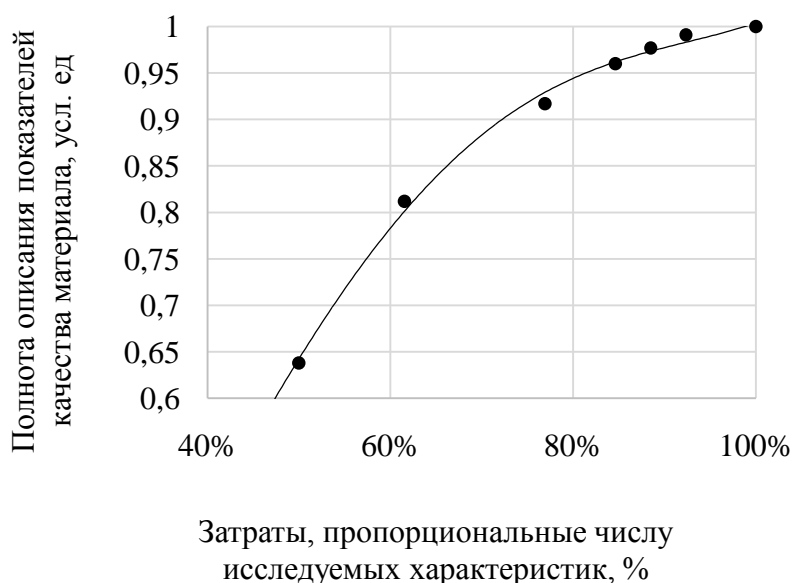


Рисунок 1 – График нарастающего результата

Степень полноты достижения результата (результативность) оценена по диаграмме Парето. Из анализа следует, что 50 % затрат при выбранной стратегии соответствует уровню полноты описания показателей материала около 64 %. При выборе для исследований характеристик ТФМ показателей группы № 1 и № 2 (см. таблицу 1) достигается полнота описания показателей материала около 81 % при примерно 61 % затрат, которые потребовались бы на исследование характеристик всех семи групп.

Таким образом, для принятия решения о применимости того или иного материала в качестве теплопроводящего покрытия необходимо описать следующие показатели качества ТФМ, относящиеся к группам № 1 и № 2, а именно: теплопроводность, длительно допустимую рабочую температуру, пробивное напряжение, удельное объемное электрическое сопротивление, электрическую прочность, относительное удлинение в момент разрыва, предел прочности при растяжении, твердость по Шору, сопротивление изоляции, поверхностное или удельное поверхностное электрическое сопротивление, условную вязкость.

Для оптимизации отношения затраты/результат недостаточно выбора показателей качества, описывающих функциональное назначение материала. Требования, предъявляемые к характеристикам измерителей теплопроводности для научных исследований и для контроля качества ТФМ на стадии производства разные, поэтому в первую очередь необходимо выделить те характеристики, на основе которых будут приниматься решения по выбору оборудования для тех или иных целей. В результате квалиметрической оценки методом экспертного ранжирования, были определены основные характеристики такого оборудования. На основе анализа диаграмм Парето и при сопоставлении основных метрологических характеристик измерителей теплопроводности и их весовых коэффициентов выбраны следующие приборы: для научных исследований — измеритель теплопроводности ИТ-λ-400, а для контроля качества материалов при их производстве — ИТЭМ-1М.

В контексте повышения результативности деятельности по исследованию показателей качества ТФМ предлагается рациональный подход взаимодействия ОУ и МИП, который заключается в предоставлении ОУ инжиниринговых услуг по научно-техническому сопровождению процесса разработки МИП на базе учебно-исследовательского комплекса (УИК). Такой подход удовлетворяет потребностям обеих сторон, а именно: ОУ заинтересовано в данном взаимодействии, поскольку УИК создает материально-техническую базу для подготовки специалистов, выполнения научно-исследовательских работ студентами, бакалаврами, магистрантами и аспирантами. МИП же заинтересованно в таком взаимодействии по причине научно-исследовательского сопровождения процесса разработки на стадиях исследования основных показателей качества инновационной продукции, которое реализуется на приемлемых для МИП условиях.

Известно, что затраты на разработку новой продукции состоят из двух частей — до постановки на производство и после его запуска. Предлагаемая концепция исследования направлена на обеспечение качества разрабатываемых ТФМ для широкого рынка на этапе разработки. Однако в случае разработки ТФМ по техническому заданию для применения в радиоэлектронных устройствах (РЭУ) специальной техники необходимо проводить более тщательное исследование показателей качества, что, в свою очередь, удорожает исследования. Согласно методу анализа видов и последствий отказов (FMEA-анализ) тщательное изучение показателей позволит в дальнейшем снизить затраты на исправление несоответствий, возникших на этапе производства.

В соответствии с п. 7.1.1 «Ресурсы для мониторинга и измерения» ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Организация должна определить и предоставить ресурсы необходимые для обеспечения достоверности и признаваемости результатов, когда мониторинг или измерения используются для верификации соответствия продукции или услуг требованиям». Для реализации этого требования используется стандарт ГОСТ Р ИСО 10012-2008, который устанавливает требования системы менеджмента качества в системе менеджмента измерений. Поскольку одним из основополагающих принципов менеджмента качества в стандартах ИСО серии 9000 является процессный подход, то и в системе менеджмента измерений процессы необходимо рассматривать как специальные процессы, направленные на обеспечение необходимого качества продукции. В контексте повышения качества продукции за счёт применения менеджмента измерений рассмотрены методы калибровки измерителя теплопроводности ИТ-λ-400, на котором производилось исследование теплопроводности ТФМ по методике согласно ГОСТ 23630.2-79.

Согласно инструкции по эксплуатации калибровка измерителя, заключающаяся в расчёте значений коэффициента пропорциональности  $K_T$ , характеризующий эффективную тепловую проводимость пластины измерителя, и поправок  $P_K$ , учитывающие тепловое сопротивление контакта, не идентичность и тепловое сопротивление заделки термодпар, в калибровочных экспериментах была выполнена с применением стандартных образцов с известной теплопроводностью из меди марки М1 ГОСТ 859-2014 и кварцевого стекла марки КВ ГОСТ 15130-86. Однако в проведенных исследованиях теплопроводности было выявлено, что при теплопроводности образца ниже 0,5 Вт/(м·К) использование полученного в регламентированной инструкции калибровке коэффициента ( $K_T=0,181$ ) и соответствующих поправок приводит к завышению его теплопроводности. Для устранения вызванных этим обстоятельством систематических отклонений при исследованиях в диапазоне изменения теплопроводности от 0,1 до 5,0 Вт/(м·К) была проведена более детальная калибровка измерителя на стандартных образцах из оптического стекла по ГОСТ 13659-78, кварцевого стекла марки КВ и органического стекла по ГОСТ 17622-72. В результате обработки совокупности полученных данных определены значения коэффициента  $K_T$  ( $K_T=0,133$ ) и поправок  $P_K$ , которые точнее описывали требуемый диапазон измерения теплопроводности с более высокой точностью (рисунок 2).

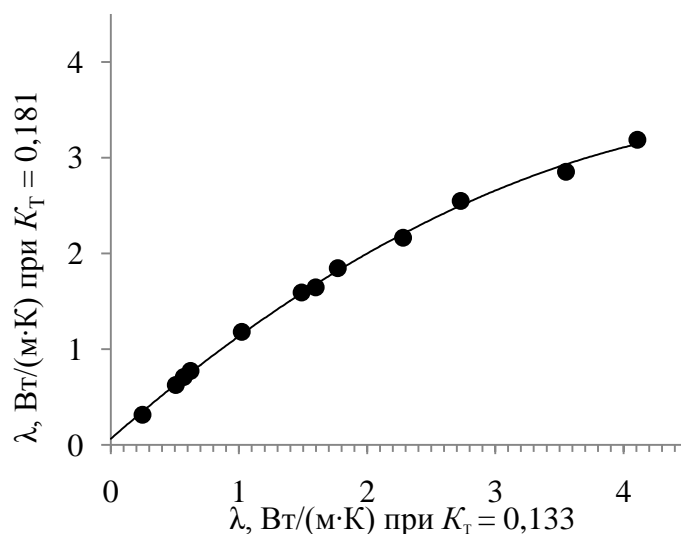


Рисунок 2 – Сравнение теплопроводности образцов, определенного при значениях поправок, полученных при штатной ( $K_T=0,181$ ) и более детальной калибровках ( $K_T=0,133$ )

Представленные на рисунке 2 данные получены на образцах композиционных материалов на основе СКТН-А с наполнителями из мелкодисперсных порошков  $\text{AlN}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SiC}$ . Для проверки промежуточной повторяемости (сходимости) и полученных значений  $K_T$  и  $P_K$  проведены контрольные измерения на образцах из следующих материалов: фторопласт Ф-4 (0,25 Вт/(м·К) – справочное значение при температуре 20 °С), гранит ((1,6–2,3) Вт/(м·К)) и прессованный фарфор ((1,4–2,5) Вт/(м·К)). Контрольные измерения показали, что более детальная калибровка устранила систематические отклонения результатов измерений.

Для расширения возможностей калибровки измерителя в более широком диапазоне изменения теплопроводности исследован метод комбинированных образцов, уточняющий калибровку по нормативной документации и тем самым повышая её точность. Проведенная оценка погрешности измерений на измерителе ИТ-λ-400 составила  $\pm 9\%$  при доверительной вероятности 0,954,  $\pm 14\%$  при доверительной вероятности 0,997 и нормальном распределении.

В диссертации рассмотрен и применен метод статистического управления качеством ТФМ на основе применения контрольных карт Шухарта, что позволило за счет контроля процесса производства снизить количество несоответствующей продукции. В результате исследования применимости контрольных карт к процессу производству ТФМ, был разработан и внедрен в производство стандарт организации «Методы и повышения качества. Контрольные карты Шухарта».

**В третьем разделе** обсуждаются результаты экспериментальных исследований теплопроводности вновь разработанных ТФМ и определены составы и объёмные содержания компонент, при которых достигается требуемое значение коэффициента теплопроводности не менее 1 Вт/(м·К) с сохранением оптимальных значений физико-механических характеристик.

В связи с тем, что теплопроводность связующего, которая формирует непрерывную фазу материала, существенно влияет на величину эффективную теплопроводность ТФМ, поэтому необходимо точно знать теплопроводность применяемых в исследовании материалов связующих. Это важно для моделирования эффективной теплопроводности исследуемых ТФМ. В таблице 2 представлены результаты исследования теплопроводности полимерных связующих, применяемых в диссертации.

Таблица 2 – Коэффициенты теплопроводности полимерных связующих

Связующее	Коэффициент теплопроводности при $25\pm 5$ °С, Вт/(м·К)
СКТН-А	0,24
СКТН-Д	0,25
СКТН-Д+ПМС-50 (20 масс. %)	0,20
СУРЭЛ-7, 27	0,41
ЭД-20	0,28

Определено объёмное содержание наполнителей с различными связующими, при котором достигается необходимое значение теплопроводности – не менее 1 Вт/(м·К) (таблица 3).

В работе определены экспериментальные зависимости теплопроводности вновь разработанных ТФМ от температуры, согласно которым с ростом температуры образцов ТФМ на основе силоксана теплопроводность уменьшается, на основе эпоксидной смолы – возрастает, а на основе полиуретановой композиции – остаётся практически не изменой.

Таблица 3 – Объёмное содержание наполнителей, при котором значение коэффициента теплопроводности  $\lambda_{эф}$  ТФМ составляет не менее 1 Вт/(м·К) при температуре  $25\pm 5$  °С.

Наполнитель	Объёмное содержание при котором $\lambda_{эф} \geq 1$ Вт/(м·К), %		
	Связующее		
	СКТН-А	СУРЭЛ-7	ЭД-20
SiO <sub>2</sub>	50	35	53
AlN (белый)	17	18	26
AlN (серый)	33 <sup>*)</sup>	15	-
$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	30	50
SiC	33	27	32

<sup>\*)</sup> – образцы с крупными агрегатами наполнителя

Экспериментальные зависимости теплопроводности ТФМ от объёмного содержания наполнителя при температуре  $25\pm 5$  °С показаны на рисунке 3.

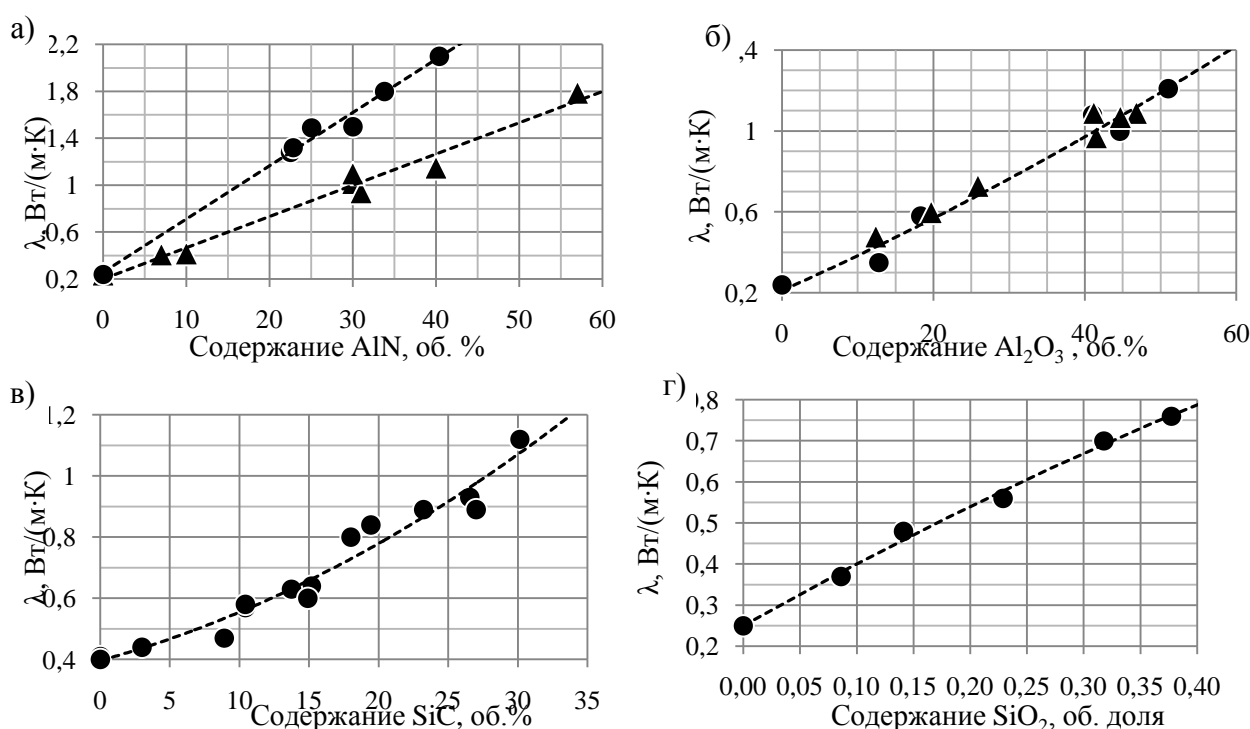


Рисунок 3 – Зависимости коэффициента теплопроводности различных композиций от объёмного содержания наполнителя: а) силиоксан+AlN: ● – бел.; ▲ – сер.; б) силиоксан+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: ● – порошок; ▲ – плавленые микросферы; в) СУРЭЛ-7+SiC; г) ЭД-20+SiO<sub>2</sub>

**Четвертый раздел** посвящен вопросам моделирования теплопроводности ТФМ. В нём проанализированы формулы, обычно применяемые для моделирования теплопроводности ТФМ, а также предложены методы моделирования теплопроводности двух- и трёхкомпонентных материалов на основе множественной регрессии и модифицированной формулы Бургера.

Теоретические модели двухкомпонентных ТФМ, как правило, содержат ряд предположений о свойствах и характеристиках фаз, а именно: простая и правильная геометрия твердых частиц; заданное распределение частиц наполнителя в объёме связующего (хаотичное или упорядоченное), что позволяет выделить типовую элементарную ячейку, которая характеризует материал в целом; изолированность или связность фаз наполнителя и/или связующего (среды); идеальный или обусловленный тепловой контакт частиц наполнителя со

связующим; отсутствие химического взаимодействия компонент (механическая смесь); рассмотрение переноса тепла по основному механизму — теплопроводности.

Расчётные модели обычно подвергаются упрощениям, поскольку разработка более подробных моделей переноса тепла в гетерогенных материалах приводит к серьёзному усложнению расчётных формул, что в свою очередь вызывает недостаточную универсальность моделей, громоздкость и сложность расчётных формул, неприемлемых для практического применения.

В настоящей работе проведены сравнения экспериментальных данных с расчётами, выполненными по формулам для эффективной теплопроводности ТФМ, предложенным Бургером, Оделевским и Миснаром [1].

Согласие расчётных значений с экспериментальными данными, полученными на образцах с наполнителями из AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> и SiC, оценивается, как неудовлетворительное. Было установлено, что расчётные модели не учитывают влияния таких особенностей ТФМ, как: агрегация частиц наполнителя, пороговый эффект образования «бесконечного кластера», изменение свойств на границе частиц наполнитель–связующее, наличие пористости, адсорбированной влаги и воздуха и др.

Для получения более согласованных экспериментальных и теоретических данных применен метод конструирования формулы эффективной теплопроводности путем инверсии наполнителя и связующего, который заключается в определении эффективной теплопроводности ТФМ по формуле [1]:

$$\lambda_{\text{эф}} = a_1\lambda_1 + a_2\lambda_2, \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  – эффективная теплопроводность смеси: связующее + порошок (твердые частицы); наполнитель – полимер (силоксан, полиуретан и др.);  $\lambda_2$  – эффективная теплопроводность смеси: связующее + полимер; наполнитель – порошок;  $a_1, a_2$  – эмпирические коэффициенты, подбираемые по правилу нормировки:  $a_1 + a_2 = 1$ ;  $a_1 < a_2$ .

Анализ экспериментальных данных и расчётного моделирования приводит к следующим выводам:

1. Для коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  приняты одни и те же значения, что делает формулу (1) универсальной для большого числа ТФМ. От принятых значений коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  зависят оценки эффективной теплопроводности наполнителя  $\lambda_n$ , обеспечивающие наилучшее согласие расчётов с экспериментальными данными.

2. Интерполяционные формулы (уравнения регрессии) описывают совокупность экспериментальных данных с высокой степенью адекватности ( $R^2 > 0,95$ ). Представление экспериментальных данных в форме интерполяционных уравнений позволит моделировать теплопроводность в зависимости от объёмного содержания наполнителя, что позволит сократить время на проведение исследования ТФМ для достижения того или иного значения.

3. Значения теплопроводности наполнителя существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц, взятых из справочников. По-видимому, это связано с агрегацией (агломерацией) частиц наполнителя, а эффективная теплопроводность агрегатов частиц существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц.

В диссертации предложен также простой метод для приближенной оценки теплопроводности двухкомпонентных ТФМ, основанный на формуле Бургера [6, 8]:

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{V_{\text{св}}\lambda_{\text{св}} + CV_{\text{н}}\lambda_{\text{н}}}{V_{\text{св}} + CV_{\text{н}}}, \quad (2)$$

где:  $\lambda$ ,  $\lambda_{\text{св}}$ ,  $\lambda_{\text{н}}$  — теплопроводность материала, связующего и наполнителя соответственно;  $V_{\text{св}}$  и  $V_{\text{н}}$  — объёмное содержание связующего и наполнителя в материале соответственно;  $C$  — эмпирический коэффициент.

Входящий в формулу (2) коэффициент  $C$  является эмпирическим, что существенно сужает область её применения. Однако в диссертации были выявлены закономерные связи этого коэффициента с характеристиками компонентов ( $\lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{св}}$ ), что позволило расширить её область применения. На основе выявленной закономерности разработана формула для расчёта эффективной теплопроводности трёхкомпонентных смесей:

$$\lambda_{\text{эф}} [V_{\text{св}} + C(V_1 + V_2)] = \lambda_{\text{св}} \frac{\rho_0 C_0}{\rho_{\text{св}} C_{\text{св}}} V_{\text{св}} + C \left[ \lambda_1 \frac{\rho_0 C_0}{\rho_1 C_1} V_1 + \lambda_2 \frac{\rho_0 C_0}{\rho_2 C_2} V_2 \right], \quad (3)$$

где:  $\rho_0 = \rho_{\text{св}} \cdot V_{\text{св}} + \rho_1 \cdot V_1 + \rho_2 \cdot V_2$ ;  $C_0 \cdot \rho_0 = C_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{св}} V_{\text{св}} + C_1 \cdot \rho_1 V_1 + C_2 \cdot \rho_2 V_2$ ;  $\lambda_{\text{эф}}$ ,  $\lambda_{\text{св}}$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  — теплопроводность смеси, связующего, первого и второго наполнителей соответственно;  $\rho_0$ ,  $\rho_{\text{св}}$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  — плотность смеси, связующего и наполнителей соответственно;  $C_0$ ,  $C_{\text{св}}$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  — массовая удельная теплоёмкость смеси, связующего и наполнителей;  $V_{\text{св}}$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  — объёмные доли связующего и наполнителей;  $C$  — безразмерный коэффициент.

На рисунке 4 приведено сравнение оценок коэффициентов  $C$  в формулах (2) и (3). По формуле (2) рассчитывались двухкомпонентные, а по формуле (3) трёхкомпонентные ТФМ в диапазоне содержания наполнителя от 10 до 60 об. %.

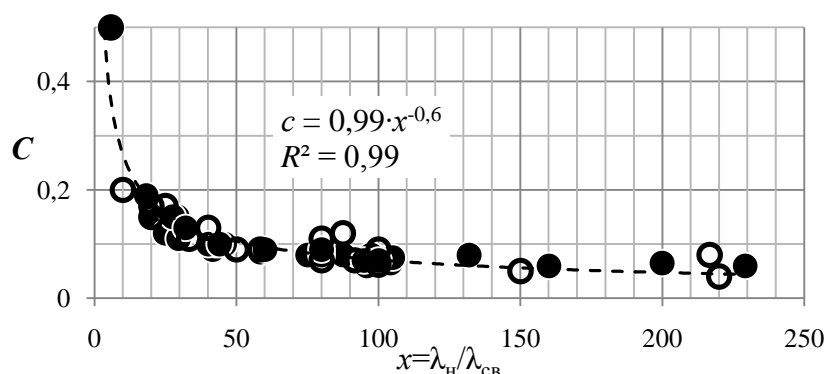


Рисунок 4 – Сравнение оценок коэффициента  $C$  в формулах: ● – (2); ○ – (3)

При исследовании образцов с наполнителем из BN обнаружено, что при содержании BN выше  $\approx 22$  об. % наблюдается значительный разброс значений теплопроводности, полученных на 30-ти образцах: от 1,46 до 4,10 Вт/(м·К) при температуре 20 °С. С учетом того, что в опубликованных ранее работах было показано, что частицы гексагонального нитрида бора при содержании 25–30 об. % образуют непрерывный трехмерный каркас в полимерной матрице, то полученные в диссертации экспериментальные данные для композиций с BN описаны с точки зрения теории перколяции. Расчёты по теории перколяции при критическом объёме  $V_{\text{кр}}=0,26$ , критических индексах:  $s=0,5$ ;  $\nu=0,48$ ;  $t=0,8$  и эффективной теплопроводности агрегатов наполнителя при температуре 20 °С —  $\lambda_{\text{н}}=50$  Вт/(м·К) удовлетворительно описывают резкое увеличение теплопроводности при объёмном содержании BN выше 22 об. % в исследованном диапазоне значений температуры от 20 до 200 °С [2].

Для моделирования теплопроводности трёхкомпонентных ТФМ в работе предложен метод, основанный на множественной регрессии. Метод заключается в том, что по совокупности экспериментальных данных для различных двухкомпонентных ТФМ с помощью статистического анализа определяют интерполяционные уравнения. Решение этих уравнений дает значения теплопроводности в точках равномерного разбиения на требуемом диапазоне

значений объёмного содержания наполнителя. Затем для выбранной пары наполнителей статистическим анализом (например, в программе *Statistica*) находится уравнение множественной регрессии. Это уравнение и определяет эффективную теплопроводность трёхкомпонентного ТФМ. Адекватность модели определяется проверкой в нескольких точках с объёмными долями  $V_1$  и  $V_2$ , теплопроводность в которых определяется экспериментально. Результат обработки выражается в виде регрессионного уравнения [3].

Из сравнений, проведенных более чем на 30-ти образцах трёхкомпонентных композиций из разных наполнителей и связующих в широком диапазоне объёмного содержания наполнителей, следует, что более чем в 96 % случаев расчёты согласуются с измеренными значениями теплопроводности в пределах  $\pm 20$  %.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В диссертации выполнен комплекс исследований, направленных на изучение вопросов, связанных с повышением результативности процесса разработки ТФМ, применяемых в качестве диэлектрических теплоотводящих покрытий и представляющих практический интерес для МИП.

На основе представленных выше результатов можно сформулировать следующие выводы:

– Разработана практичная методика повышения результативности научно-технического сопровождения разработок ТФМ, включая метрологическое обеспечение исследований и контроля качества. Методика основана на квалиметрической оценке показателей качества методом экспертного ранжирования, распределении Парето «результат/затраты», методах повышения точности и достоверности результатов экспериментальных исследований теплопроводности ТФМ и применении контрольных карт Шухарта. Методика особенно удобна для практического применения на МИП.

– Вновь разработаны и созданы образцы двух- и трёхкомпонентных ТФМ на основе полимерных связующих (силикон, полиуретан и эпоксидная смола) и дисперсных наполнителей (порошки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$  и  $\text{BN}$ ), предназначенные для диэлектрических теплопроводящих покрытий, обеспечивающие требуемые значения показателей качества (патент РФ на изобретение RU2645533C1, заявки на выдачу патентов РФ на изобретение № 2016140443 от 13.10.2016 г., № 2016140444 от 13.10.2016 г., № 2017100478 от 09.01.2017 г.).

– Получен массив новых экспериментальных результатов по теплопроводности для вновь разработанных двух- и трёхкомпонентных ТФМ на основе полимерных связующих в зависимости от температуры и объёмного содержания дисперсного наполнителя (порошки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$  и  $\text{BN}$ ).

– Предложена расчётная модель и методика расчёта эффективной теплопроводности двух- и трёхкомпонентных ТФМ, основанные на расчётно-экспериментальном методе статистического моделирования и модифицированной формуле Бургера, адекватность которых подтверждена экспериментально. Методика позволяет предварительно подобрать вид и объёмное содержание дисперсного наполнителя для достижения требуемых значений теплопроводности материалов на основе полимерных связующих (силикон, полиуретан и эпоксидная смола) и дисперсных наполнителей (порошки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$  и  $\text{BN}$ ) с минимальными затратами.

– Разработан и внедрен стандарт организации в ООО «Столп» по повышению качества ТФМ на стадии их производства. Стандарт основан на применении контрольных карт Шухарта



и позволяет повысить качество ТФМ за счёт получения стабильного и управляемого процесса их производства.

– На основе полученных результатов по теплопроводности материалов выигран конкурс на грант для дальнейшего развития и реализацию проекта «Разработка, изготовление и исследование опытных образцов теплопроводящих компаундов с повышенным уровнем диэлектрических и теплопроводящих характеристик» (Договор № 2157ГС1/35317 от 18.09.2017 г. с Фондом развития инноваций).

– Внедрение разработанных новых моделей, метода, моделей и стандарта позволило создать новые ТФМ с высокими значениями теплопроводности и физико-механическими характеристиками, снизить затраты на проведение исследований ТФМ на 15-25 % и снизить количество несоответствующей продукции на 10-15 %, что подтверждено актами о внедрении результатов диссертационного исследования.

Таким образом, в диссертации решен круг поставленных научно–технических задач, связанных с повышением результативности процесса разработки ТФМ, применяемых в качестве диэлектрических теплоотводящих покрытий.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### **Список работ, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Михеев, В.А. Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 7. – С. 571-575.
2. Михеев, В.А. Зависимость теплопроводности композиционного материала на основе силикона от объемного содержания нитрида бора / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59. – № 4. – С. 317-322.
3. Михеев, В. А. Моделирование теплопроводности трёхкомпонентных композиций / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59. – № 7. – С. 584-591.
4. Михеев, В. А. Метрологическое обеспечение контроля качества композиционных материалов для теплопроводящих диэлектрических покрытий / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе // Качество. Инновации. Образование. – 2017. – №1 (140). – С. 74-80.
5. Михеев, В. А. Инжиниринговые услуги образовательного учреждения высшего образования как эффективный инструмент поддержки инновационной деятельности малых предприятий / В.Ш. Сулаберидзе, В.А. Михеев, А.Г. Грабарь, Т.П. Мишура // Качество. Инновации. Образование. – 2017. – №3 (142). – С. 22-27.
6. Михеев, В. А. Линейная модель теплопроводности дисперсных материалов на основе полимерных связующих / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – № 3. – С. 275-279.
7. Михеев, В. А. Уточнение калибровки измерителя теплопроводности в исследованиях композиционных материалов для теплопроводящих покрытий в изделиях электронной техники / В.Ш. Сулаберидзе, В.А. Михеев // Вопросы радиоэлектроники. – 2018. № 1. – С. 110-117.

### **Список остальных работ, опубликованных по теме диссертации:**

8. Михеев, В. А. Расчётно-экспериментальные исследования эффективной теплопроводности композиционных материалов на основе полимеров / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе // Мир измерений. – 2017. – № 3. – С. 26-28.
9. Михеев, В. А. Оценка показателей качества новых функциональных материалов в экспертных испытаниях / Н.Ю. Ефремов, В.А. Михеев, В.Д. Мушенко, В.Ш. Сулаберидзе // Век качества. – 2014. – № 4. – С. 81-83.

10. Михеев, В.А. Дисперсный анализ порошкообразного материала методом микроскопии / В.А. Михеев, Д.В. Шмыров // Молодежь. Техника. Космос. Труды VIII Общероссийской молодежной научно-технической конференции – СПб, БГТУ, 2016. – С. 27-28.

11. Михеев, В. А. Прогнозирование теплопроводности диэлектрических теплопроводящих покрытий / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине: тезисы докладов X Международной научно-практической конференции. – СПб, 2016. – С. 85-88.

12. Михеев, В. А. Теплопроводность композиционного материала на основе силикона с различными наполнителями / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // Молодёжь. Техника. Космос. Труды конференции БГТУ "ВОЕНМЕХ". – СПб, 2014. – С. 242-243.

13. Михеев В. А. Теплопроводность заливочных компаундов на основе силикона для диэлектрических теплопроводящих покрытий в электронике / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // 5-я Всероссийская и стран-участниц КОOMET конференция по проблемам термометрии: тез. докл. – СПб: изд-во ООО «БРЕЗА», 2015. – С.245-248.

14. Михеев В. А. Разработка и исследование теплофизических характеристик новых композиционных теплопроводящих материалов на основе полиуретана / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // Научная конференция «Традиции и инновации», посвящённая 187-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета): тез. докл. – СПб, 2015. – С. 212.

15. Михеев, В. А. Исследование теплопроводности диэлектрического компаунда на основе силикона с разными наполнителями / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // Высокие технологии, фундаментальные исследования, инновации: сборник статей Семнадцатой международной научно-практической конференции Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике СПбГПУ; ред. Кудинов А.П., Кудинов М.А.- СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. – С. 151-153.

16. Михеев, В. А. Теплопроводность композиционного материала на основе силикона с нитридом алюминия в качестве наполнителя / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: труды VI общероссийской науч.- практ. конференции, БГТУ «ВОЕНМЕХ». – СПб, 2013. – С. 77-80.

17. Михеев, В.А. Особенности описания теплопроводности композиционных материалов на основе силикона / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко, В.И. Юлиш // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: труды VII Общероссийской научно-практической конференции. Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», 2015. – С.102-108.

18. Михеев, В. А. Исследование характеристик заливочных компаундов на основе силикона с наполнителями / Н.Ю. Ефремов, В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // Сборник: Фундаментальные основы баллистического проектирования IV Всероссийская научно-практическая конференция, БГТУ «ВОЕНМЕХ». – СПб, 2014. – С. 106-107.

19. Михеев, В. А. Метрология: методические указания к выполнению и оформлению отчетов лабораторных работ / В.Ш. Сулаберидзе, Т.П. Мишура, В.А. Михеев, Л.А. Елисеева. – СПб: ГУАП, 2017. – 83 с.

#### **Список заявок на выдачу патента РФ:**

20. Теплопроводящий герметик: патент 2645533 Рос. Федерация: МПК С09К 3/10, С09К 5/08, С08L 83/00 / Мушенко В.Д., Сулаберидзе В.Ш., Михеев В.А. и [др]; заявитель и патентообладатель Мушенко В.Д., Сулаберидзе В.Ш., Михеев В.А. и [др]. – № 2017100566; заявл. 09.01.2017; опубл. 21.02.2018. – Бюл. № 6.

21. Заявка на выдачу патента РФ на изобретение № 2017100478. Михеев и [др.] «Теплопроводящий компаунд для герметизации» от 09.01.2017.

22. Заявка на выдачу патента РФ на изобретение № 2016140443. Михеев и [др.] «Теплопроводящий композиционный материал» от 13.10.2016.

23. Заявка на выдачу патента РФ на изобретение № 2016140444. Михеев и [др.] «Теплопроводящий компаунд» от 13.10.2016.