



О Т З Ы В

ФГУП «Российский научный центр «Прикладная химия»
на автореферат диссертации **МИХЕЕВА Владислава Александровича** на тему:
«Обеспечение качества новых функциональных материалов для теплопроводящих
покрытий на стадии разработки и производства»,
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности
05.02.23 — Стандартизация и управление качеством продукции

Объективная потребность в новых теплопроводящих функциональных материалах (ТФМ) на полимерной основе, представляющих собой изотропные системы «низковязкий полимер/дисперсный наполнитель» — одна из основ развития отечественной микроэлектронной и электротехники. От правильного качественного и количественного сочетания полимерного связующего и дисперсного минерального наполнителя, их взаимной совместимости и исходных свойств зависят эксплуатационные свойства ТФМ. При этом весьма существенный момент — отечественное происхождение применяемых полимерных связующих и дисперсных наполнителей, а также химических компонентов для их технологической подготовки. Характеристики ТФМ определяют показатели их качества, к важнейшим из которых относят показатели функционального назначения — отвод тепла, защита от воздействия окружающей среды, электрическая изоляция, дополнительная механическая фиксация элементов аппаратуры.

Актуальность разработки новых ТФМ, одновременно реализующих несколько функций, обусловлена несоответствием характеристик существующих материалов (как отечественных, так и импортных) текущим и перспективным требованиям, предъявляемым к их применению в конкретных изделиях. Для новых ТФМ характерна проблема недостатка, а подчас и отсутствия информации о характеристиках, описывающих их свойства, необходимая для обоснованного выбора материала.

Разработку новых ТФМ осуществляют предприятия различных форм собственности с разным масштабом производства, в том числе малые инновационные предприятия (МИП). Контроль качества разрабатываемой продукции основывается на результатах объективного определения её характеристик в процессе испытаний на различных стадиях жизненного цикла. Информативность описания характеристик и свойств создаваемого материала должна быть достаточной для принятия обоснованного и квалифицированного решения о его пригодности для конкретного использования.

МИП, разрабатывающие новые образцы ТФМ, как правило, не имеют возможности создавать собственную испытательную базу для оценки всех показателей качества материалов и проводить испытания в соответствующих объёмах. Для таких предприятий одной из

приоритетных задач по повышению конкурентоспособности является минимизация затрат на создание материалов и исследование их характеристик. Отсюда возникает проблема оптимизации испытаний путём формирования ограниченного, но представительного набора изучаемых и контролируемых характеристик ТФМ с применением инструментов обеспечения качества.

Таким образом, к проблемам, связанным с использованием ТФМ в микроэлектронной и электротехнике, следует отнести:

- необходимость разработки, исследования и внедрения новых ТФМ отечественного происхождения (импортозамещение);
- отсутствие информации о характеристиках новых ТФМ, достаточной для оценки их качества;
- отсутствие у МИП, разрабатывающих новые ТФМ, необходимых ресурсов для исследования характеристик и контроля качества создаваемой продукции на стадиях разработки и производства.

Эти проблемы в той или иной степени затронуты в диссертации В.А. МИХЕЕВА, в связи с чем её *актуальность* не вызывает сомнений.

Диссертация посвящена решению задач, которые непосредственно влияют на обеспечение качества новых ТФМ на стадии разработки и производства на МИП, а также позволяют более конкретно подходить к научно–техническим вопросам, возникающим при проектировании приборов микроэлектроники и электротехники. Среди *научных результатов* хотелось бы отметить те, которые представляются наиболее важными.

Главное внимание в своей работе автор уделил разработке «методики повышения результативности» научно–технического сопровождения разработок новых ТФМ для теплопроводящих диэлектрических покрытий, основанной на квалиметрической оценке технических показателей качества и метрологическом обеспечении исследований и контроля качества, удобной для практического применения на МИП.

В результате квалиметрической оценки, выполненной методом экспертного ранжирования, автором сформирована таблица значимости семи различных групп технических показателей качества ТФМ и построена функция нарастающей полноты достижения результата в зависимости от количества исследуемых характеристик. Оценка степени полноты достижения результата по диаграмме Парето «результат/затраты» показала, что при выборе для исследований характеристик ТФМ только двух групп (функциональных и физико–механических) показателей достигается достаточно высокая полнота описания показателей материала — около 81% при примерно 61% затрат, которые потребовались бы на исследование характеристик всех семи групп. Отсюда следует логичный вывод о том, что для принятия решения о применимости того или иного материала в качестве теплопроводящего покрытия достаточно описать только функциональные и

физико–механические показатели качества ТФМ (теплопроводность, длительно допустимую рабочую температуру, пробивное напряжение, удельное объёмное электрическое сопротивление, электрическую прочность, относительное удлинение в момент разрыва, предел прочности при растяжении, твёрдость по Шору, сопротивление изоляции, поверхностное или удельное поверхностное электрическое сопротивление и условную вязкость).

Кроме технических показателей «методика повышения результативности» предполагает оптимизацию метрологического обеспечения. В результате квалиметрической оценки, анализа диаграмм Парето и при сопоставлении основных метрологических характеристик измерителей теплопроводности и их весовых коэффициентов автором выбраны следующие приборы: для научных исследований — измеритель теплопроводности ИТ-λ-400, а для контроля качества материалов при их производстве — ИТЭМ-1М.

С точки зрения повышения качества продукции за счет применения менеджмента измерений в «методике повышения результативности» автором предложены более детальные способы калибровки измерителя теплопроводности ИТ-λ-400, на котором производилось исследование теплопроводности ТФМ, позволившие расширить диапазон измерения коэффициента теплопроводности от 0,1 до 5 Вт/(м·К), устранить систематические отклонения результатов измерений и повысить их точность.

С точки зрения повышения эффективности и результативности деятельности по исследованию показателей ТФМ на МИП «методикой повышения результативности» предлагается рациональный подход к взаимодействию МИП и образовательного учреждения. Подход заключается в предоставлении образовательным учреждением инжиниринговых услуг по научно–техническому сопровождению процесса разработки МИП на базе учебно–исследовательского комплекса, обеспеченного методиками исследований наиболее значимых показателей качества функциональных материалов.

И, наконец, «методика повышения результативности» предполагает использование метода статистического управления качеством ТФМ на основе контрольных карт Шухарта, что позволяет за счет контроля процесса производства снизить количество несоответствующей продукции.

В диссертации разработаны *новые* двух– и трёхкомпонентные ТФМ на основе полимерных связующих из силикона, полиуретана и эпоксидной смолы с дисперсными минеральными наполнителями из порошков SiO₂, SiC, Al₂O₃, AlN, BN и их комбинаций, обеспечивающие требуемые значения показателей качества.

В экспериментальной части диссертации несомненный интерес представляют результаты исследований теплопроводности *вновь разработанных* ТФМ по определению составов и объёмного содержания компонент, при которых достигается величина коэффициента теплопроводности не менее 1 Вт/(м·К) с сохранением оптимальных значений физико–

механических характеристик. В ходе работы исследованы факторы агломерации частиц наполнителей, которые могут снижать теплофизические свойства.

В теоретической части диссертации рассмотрены особенности определения эффективной теплопроводности ТФМ и влияния дисперсности наполнителя на его теплопроводность. Проанализированы формулы Бургера, Оделевского и Миснара, обычно применяемые для аналитического моделирования теплопроводности ТФМ. Установлено, что они не учитывают влияния таких особенностей, как агрегация частиц наполнителя, пороговый эффект образования «бесконечного кластера», изменение свойств на границе частиц «наполнитель/связующее», наличие пористости, адсорбированной влаги воздуха. Для более полного согласования данных расчётов и экспериментов использован метод конструирования формулы эффективной теплопроводности путем инверсии наполнителя и связующего. Автором предложены *новые* методы аналитического моделирования теплопроводности двух- и трёхкомпонентных ТФМ на основе множественной регрессии, расчётно-экспериментальном статистическом моделировании и использовании модифицированной формулы Бургера, адекватность которых подтверждена экспериментально.

Новизна полученных в диссертации результатов подтверждается патентом РФ и тремя заявками на изобретения, а также монографией и публикациями в авторитетных отечественных научных изданиях, в том числе из Перечня ВАК РФ. Кроме того, автором выигран конкурс на грант Фонда развития инноваций в поддержку дальнейшего развития и реализацию проекта «Разработка, изготовление и исследование опытных образцов теплопроводящих компаундов с повышенным уровнем диэлектрических и теплопроводящих характеристик».

Практическое значение имеет ряд результатов, которые могут быть использованы:

- на предприятиях электротехнической, радиоэлектронной и приборостроительной промышленности при создании новых отечественных ТФМ, предназначенных для диэлектрических теплопроводящих покрытий, обеспечивающих требуемые значения показателей качества;
- при конструировании аппаратуры на основе новых ТФМ, обладающих высокой теплопроводностью с сохранением функциональных характеристик материала;
- при теоретической интерпретации получаемых разработчиками и пользователями материалов данных по теплопроводности новых ТФМ;
- в организациях-разработчиках для корректировки технологии изготовления теплопроводящих диэлектрических покрытий с целью оптимизации их характеристик и обеспечения качества, в том числе и в отношении инновационной продукции малых предприятий на стадии разработки и производства.

Среди **недостатков** работы можно отметить следующие:

1. Из автореферата не ясно, что представляет собой испытуемый образец нового ТФМ. Каким образом изготовлены образцы с различным содержанием минеральных дисперсных наполнителей? Как контролировалась степень неоднородности фазы?

2. В автореферате отмечено, что в работе проводились исследования зависимости теплофизических свойств вновь разработанных ТФМ от температуры, но не приведено ни одной зависимости на этот счёт.

3. Не совсем понятно, а в чём собственно заключается специфика применения разработанной «методики повышения результативности» именно для МИП? Можно ли применять её и для больших предприятий?

В целом диссертация В.А. МИХЕЕВА является законченной научной квалификационной работой, содержащей решение актуальной научно–технической задачи, представляет научный и практический интерес.

Судя по автореферату и перечню публикаций, диссертация удовлетворяет требованиям положения ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям (пункт 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г.), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.23 — Стандартизация и управление качеством продукции.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научно–технического совета Научно–исследовательского отдела №30 (протокол № 01–18 от 24.04.2018 г.).

Начальник лаборатории
ФГУП «РНЦ «Прикладная химия»
доктор технических наук, профессор,
лауреат премии Правительства РФ
в области науки и техники

И.А Фёдоров

Подпись И.А. Фёдорова заверяю.

Учёный секретарь
ФГУП «РНЦ «Прикладная химия»
кандидат химических наук, доцент



В.И. Мануйлова

Фёдоров Игорь Апполинариевич — начальник лаборатории №306
Федерального государственного унитарного предприятия
«Российский научный центр «Прикладная химия».
193232, г. Санкт–Петербург, ул. Крыленко, д.26-а
Т. (812) 647-92-77 *2501
E-mail: i.fedorov@giph.su