



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**Васильев Иван Михайлович**

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕЙ ПАСТЫ  
(ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики  
материалов, изделий, веществ и природной среды

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Солдатов Алексей Иванович**

**Официальные  
оппоненты:**

**Кузичкин Олег Рудольфович**, доктор технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт инженерных и цифровых технологий (Муром)», профессор кафедры информационных и робототехнических систем.

**Клопотов Анатолий Анатольевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры прикладной механики и материаловедения. (г.Томск).

Защита диссертации состоится «16» июня 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru)

Автореферат разослан «13» мая 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.13  
кандидат технических наук, доцент



Шевелева Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

В современной технике повсеместно применяется теплопроводящая паста, получившая еще одно название – термоинтерфейс, задача которого улучшить качество теплопереноса от греющегося элемента к радиатору охлаждения. Дефекты, появившиеся после нанесения теплопроводящей пасты на радиатор охлаждения, могут привести к негативным последствиям, таким как снижение производительности и срок службы силового элемента, ложного срабатывания цепей защиты от перегрева и пр. Поэтому своевременный контроль теплофизических параметров теплопроводящей пасты позволяет избежать снижения надёжности работы прибора и системы в целом, а так же его преждевременного отказа.

В настоящее время контроль теплофизических параметров термоинтерфейса после его нанесения на теплоотводящую поверхность осуществляется вручную, либо косвенными методами, причем контроль существующими методами возможно проводить только на этапе летучего или выборочного контроля. Выходной контроль теплофизических параметров термоинтерфейса в некоторых случаях возможен, но для его осуществления исследуемый прибор должен иметь температурозависимый параметр, но следует учитывать, что полученные данные зависят так же и от косвенных параметров изделия, например, от теплоемкости корпуса. Существующие методы неразрушающего контроля, не позволяют контролировать теплофизические характеристики термоинтерфейса после установки тепловыделяющего элемента на радиатор охлаждения с термоинтерфейсом в автоматическом режиме, а так же исключить влияние других факторов тепловой схемы исследуемого прибора.

В связи с этим возникла задача разработать способ контроля параметров термоинтерфейса на любом этапе активного срока существования изделия без демонтажа тепловыделяющего элемента от радиатора охлаждения.

**Цель** диссертационной работы: исследование термоэлектрического метода для контроля параметров термоинтерфейса после его установки с тепловыделяющим элементом на радиатор охлаждения.

Данные цели достигаются путем решения следующих **задач**:

1. Определить зависимость возникающей термоЭДС между разнородными образцами из типовых материалов, применяемых при изготовлении корпусов силовых приборов и радиаторов охлаждения, от характера распределения термоинтерфейса по поверхности образцов.

2. Провести исследования электрических характеристик возникающей термоЭДС.

3. Разработать термоэлектрический метод контроля теплофизических параметров термоинтерфейса после установки тепловыделяющего элемента на радиатор охлаждения с теплопроводящей пастой.

**Объектом исследования** в представленной работе является термоЭДС, возникающая между разнородными металлическими поверхностями тепловыделяющего элемента и радиатора охлаждения.

**Предметом исследования** является метод контроля теплофизических параметров термоинтерфейса термоэлектрическим методом.

**Научная новизна работы.** В качестве результатов работы можно выделить следующие новые научные знания:

1. Предложен способ термоэлектрического контроля теплофизических параметров термоинтерфейса, основанный на зависимости термоЭДС от характера распределения теплопроводящей пасты между двумя металлическими поверхностями, защищенный патентом РФ № 2686859

2. Исследован характер возникновения термоЭДС между разнородными образцами из типовых материалов, применяемых при изготовлении корпусов тепловыделяющих элементов и радиаторов охлаждения и получены аналитические выражения для определения термоЭДС, позволяющие учитывать характер распределения термоинтерфейса между корпусом тепловыделяющего элемента и радиатором охлаждения.

3. Разработана модель для исследования теплофизических параметров термоинтерфейса, расположенного между двумя металлическими поверхностями, позволяющая проводить исследования в широком диапазоне изменения различных параметров металлических поверхностей и термоинтерфейса.

4. Проведены исследования электрических свойств возникающей термоЭДС при различном характере распределения термоинтерфейса между образцами, выявлена линейная зависимость термоЭДС от площади покрытия термоинтерфейсом корпуса тепловыделяющего элемента.

#### **Практическая значимость.**

1. Полученные аналитические выражения для определения величины термоЭДС могут быть использованы для оценки характера распределения термоинтерфейса между корпусом силового прибора и радиатором охлаждения.

2. Предложенный способ термоэлектрического контроля позволяет определить теплофизические параметры термоинтерфейса между металлическими поверхностями, между которыми при нагреве возникает термоЭДС, на любом этапе эксплуатации прибора.

3. Результаты работы внедрены в учебный процесс в национальном исследовательском Томском политехническом университете и на предприятии ООО «ЛЭМЗ-Т».

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

1. Термоэлектрический метод позволяет контролировать теплопроводящие параметры термоинтерфейса в промежуточном слое между радиатором охлаждения и корпусом тепловыделяющего элемента.

2. Разработанная модель на основе термоэлектрического метода, позволяет контролировать теплофизические параметры термоинтерфейса в промежуточном слое между радиатором охлаждения и корпусом тепловыделяющего элемента в широком диапазоне изменения различных

параметров теплопроводящей пасты, радиатора охлаждения и корпуса тепловыделяющего элемента.

3. ТермоЭДС в установившемся режиме между корпусом силового элемента ТО220 с медным никелированным основанием и радиатором охлаждения из алюминиевого сплава марки АД31 линейно уменьшается от 40 до 20 мкВ при изменении площади покрытия тепловыделяющего элемента термоинтерфейсом КТП-8 от 0 до 100% при температуре радиатора охлаждения 100°C. Погрешность определения площади не превышает 10%.

**Достоверность полученных теоретических и экспериментальных исследований,** обеспечивается корректным применением современных численных методов, многочисленными экспериментальными исследованиями, высокой повторяемостью результатов и сопоставлением результатов, полученных при аналитическом расчете, а также практическим применением способа контроля теплофизических параметров термоинтерфейса для обнаружения образцов с дефектами термоинтерфейса.

**Вклад автора:** постановка целей и задач, разработка математической модели для исследования теплопроводящих параметров термоинтерфейса. Предложен термоэлектрический способ контроля теплофизических параметров термоинтерфейса, располагающегося между корпусом тепловыделяемого элемента и радиатором охлаждения, его экспериментальная проверка на лабораторных образцах и реальных приборах. Проведены исследования возникающей термоЭДС при различном характере распределения термоинтерфейса между двумя металлическими образцами. На предложенный способ и экспериментальную установку получены патенты РФ.

#### **Апробация работы и публикации.**

Приведенные в данной диссертационной работе материалы представлены на следующих конференциях:

XXIII Международная научно–практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно–космических систем академика М. Ф. Решетнева «Решетневские чтения», г. Красноярск, 2019 г.

XV Международная школа–конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Инноватика – 2019», г. Томск, 2019 г.

XIII Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2019 г.

Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР – 2020», г. Томск, 2020 г.

XX Научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства», г. Томск, 2020 г.

III международный форум «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции», г. Томск, 2020 г.

XXXII Уральская конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», Екатеринбург, 2020.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 13 печатных работах, в том числе одна статья в журнале из перечня ВАК и две

статьи в журналах, индексируемых в Scopus, одна публикация в журнале из перечня WoS, 7 публикаций индексируемых в РИНЦ, получено 2 патента РФ.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации составляет 126 страниц, 68 рисунков и 6 таблиц. Обзор литературных данных включает 98 источников.

**Во введении** приведено обоснование актуальности работы, поставлены цели диссертационной работы, показывается практическая ценность работы, излагаются научные результаты.

**В первой главе** приведены основные типы термоинтерфейсов, их основные характеристики, сделан сравнительный анализ каждого типа и примеры их применения. Под термоинтерфейсом понимается слой теплопроводящего состава между охлаждаемой поверхностью и отводящим тепло устройством.

В качестве широко применяемых термоинтерфейсов можно выделить теплопроводящие прокладки, пасты, клеи. Отечественная промышленность производит термоинтерфейс: «Кремнийорганическая паста теплопроводящая КПП-8».

Объем современных электронных приборов, при сохранении удельной мощности, стараются минимизировать, поэтому радиаторы для охлаждения транзисторов берут такого размера, чтобы температура транзистора при номинальной нагрузке не превышала нормальные условия эксплуатации, указанные в технических условиях, т.е. порядка 70-100 градусов Цельсия.

Основной теплофизической характеристикой термоинтерфейса, характеризующей его качество, является тепловое сопротивление. Вклад теплового сопротивления термоинтерфейса в общее тепловое сопротивление тепловой схемы прибора  $R_{thcs}$  составляет от 20% до 65%, поэтому термоинтерфейс должен полностью заполнить воздушный промежуток между корпусом тепловыделяющего элемента и радиатором охлаждения, а толщина слоя термоинтерфейса должна иметь оптимальное значение, т.к. очень тонкий слой может не обеспечить качественной теплопередачи за счет неполного заполнения воздушных полостей (рисунок 1).

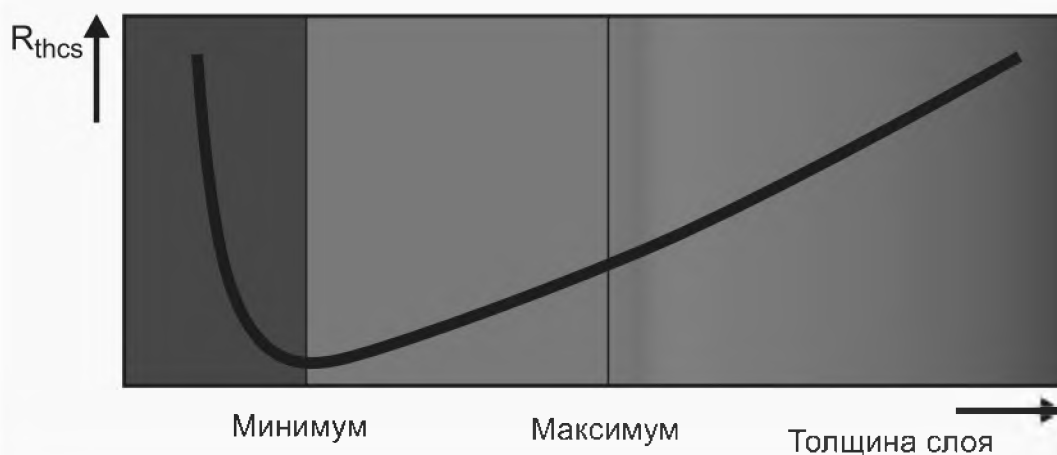


Рисунок 1. Зависимость теплового сопротивления корпус-радиатор от толщины слоя термоинтерфейса

Наличие воздушных полостей в промежутке между корпусом тепловыделяющего элемента и радиатором охлаждения или плохие теплофизические характеристики термоинтерфейса, обусловленные неправильным нанесением термоинтерфейса, при длительном использовании прибора может привести к перегреву прибора и в конечном итоге сокращению срока службы изделия или выходу из строя. В технических данных на выпускаемый полупроводниковый прибор, имеющий возможность крепления к радиатору, производитель даёт рекомендации по выбору радиатора и использованию теплопроводящего компаунда. Особенно важно это для полевых транзисторов т.к. сопротивление открытого состояния напрямую зависит от температуры кристалла, а сопротивление открытого состояния в свою очередь влияет на КПД преобразователей напряжений.

Некоторые компании поставляют свои приборы потребителям с уже нанесённым термоинтерфейсом, что увеличивает стоимость прибора по сравнению с аналогами. Однако, данная мера не исключает возможности нарушения целостности термоинтерфейса при транспортировке или монтаже прибора на радиатор без дополнительного визуального осмотра перед установкой.

В настоящее время, имеется несколько методов обеспечения требуемых теплофизических характеристик термоинтерфейса при установке тепловыделяющего элемента на радиатор охлаждения.

**Взвешивание на прецизионных весах.** Использование этого метода не гарантирует обеспечение требуемых теплофизических характеристик термоинтерфейса, т.к. они зависят не только от количества теплопроводящего компаунда, но и от его распределения между радиатором и корпусом прибора. При неравномерном распределении термоинтерфейса возможен локальный перегрев элемента.

**Использование трафарета.** Требуемые теплофизические характеристики термоинтерфейса обеспечиваются за счет использования оптимального количества термоинтерфейса. Его количество зависит от толщины трафарета, площади отверстий и расстояния между отверстиями и рассчитывается по формуле:

$$V_{TIS} = S_{\text{отв.}} \cdot h_{\text{траф.}} \quad (1)$$

где  $V_{TIS}$  – объём термоинтерфейса;  $S_{\text{отв.}}$  – суммарная площадь всех отверстий в трафарете;  $h_{\text{траф.}}$  – толщина трафарета.

Данный метод не позволяет контролировать тепловое сопротивление термоинтерфейса при ухудшении его свойств.

#### **Использование механических толщиномеров.**

Для обеспечения требуемых теплофизических характеристик термоинтерфейса широко используются простые механические толщиномеры гребенчатого типа (рисунок 2). Толщиномер устанавливается на проверяемую поверхность с термоинтерфейсом базовыми зубцами, и перемещается

параллельно исследуемой поверхности, опираясь на базовые зубцы. Т.к. измерительные зубцы находятся на известном расстоянии от базовых зубцов, оставленный ими след на слое термоинтерфейса свидетельствует о толщине термоинтерфейса.

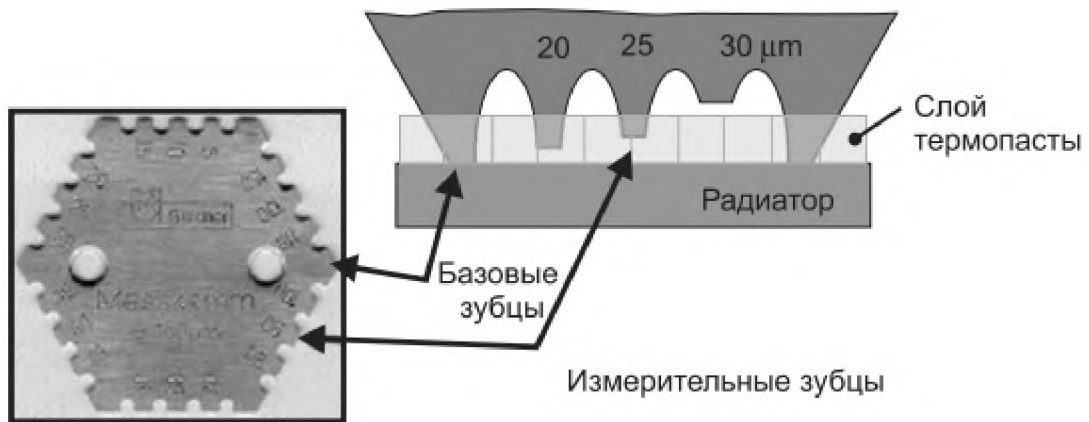


Рисунок 2. Механический толщиномер гребенчатого типа

К недостатку данного способа можно отнести повреждение слоя в зоне контроля и обязательный визуальный контроль после каждого измерения.

**Метод контроля теплофизических характеристик термоинтерфейса с помощью передаточной схемы.** Многие выпускаемые приборы имеют так называемый температурозависимый параметр. Общее тепловое сопротивление «кристалл–корпус» или «кристалл–окружающая среда»  $R_{Tjx}$  полупроводниковых приборов определяется выражением:

$$R_{Tjx} = \frac{T_j - T_x}{P_{pn}} \quad (2)$$

где  $T_j$  – температура кристалла полупроводникового прибора;  $T_x$  – температура корпуса или окружающей среды;  $P_{pn}$  – мощность тепловыделения прибора.

**Стандартный метод контроля теплофизических параметров термоинтерфейса.** Теплофизические параметры термоинтерфейса определяется через значения заранее известных тепловых сопротивлений и емкостей элементов тепловой схемы:

$$C_{th\Sigma} = \frac{P_{heat} \cdot t}{T_{sc}(t) - T_{sc}(0)}, \quad R_{th\Sigma} = \frac{T_{sc}(t) - T_{sc}(0)}{P_{heat}} \quad (3)$$

где  $P_{heat}$  – величина рассеиваемой мощности прибора;  $T_{sc}(t)$  – начальная температура кристалла прибора,  $C_{th\Sigma}$  – теплоемкость,  $R_{th\Sigma}$  – тепловое сопротивление.

При определении передаточной функции необходимо поддерживать температуру корпуса объекта постоянной, что усложняет процесс контроля и схему измерительной установки в целом.

**Модуляционный метод контроля теплофизических параметров термоинтерфейса.** В данном методе на исследуемый объект подается



последовательность импульсов тока длительностью  $t_{\text{имп}}$ , которая выражается по формуле:

$$t_{\text{имп}} = t_{\text{ср}}(1 + k \cdot \sin 2\pi ft) \quad (4)$$

где  $t_{\text{ср}}$  – среднее значение длительности импульсов;  $k$  – коэффициент модуляции;  $f$  – частота подачи импульсов.

В этом случае средняя греющая мощность  $P_{\text{гр}}(t)$  будет определяться выражением:

$$P_{\text{гр}}(t) = P_{\text{ср}} + P_{\text{перем}} \cdot k \cdot \sin 2\pi ft \quad (5)$$

где  $P_{\text{ср}}$  – средняя подаваемая мощность;  $P_{\text{перем}}$  – размах амплитуды переменной составляющей подаваемой мощности.

Нелинейное изменение греющей мощности влияет на изменение температуры кристалла с некоторым смещением по времени (сдвиг фазы температуры). Сдвиг фазы температуры определяется:

$$\varphi = \text{arctg} \frac{B(f)}{A(f)} \quad (6)$$

где  $A(f)$  – мнимая составляющая; где  $B(f)$  – вещественная составляющая.

Функции  $A(f)$  и  $B(f)$  определяются через дискретное преобразование Фурье по выражениям:

$$A(f) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N T_{\text{SC}}(t) \cdot \cos\left(2\pi \frac{i}{N}\right), \quad B(f) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N T_{\text{SC}}(t) \cdot \sin\left(2\pi \frac{i}{N}\right) \quad (7)$$

Модуль теплового импеданса  $|Z_T(f)|$  определяется как:

$$|Z_T(f)| = \sqrt{\frac{A^2(f) + B^2(f)}{P_{\text{перем}}}} \quad (8)$$

Проведенный анализ показал, что в настоящее время не существует неразрушающий метод контроля теплофизических параметров термоинтерфейса в промежуточном слое между радиатором охлаждения и корпусом тепловыделяющего элемента после установки тепловыделяющего элемента на радиатор охлаждения. Опираясь на результаты литературного анализа предлагается термоэлектрический метод контроля теплофизических параметров термоинтерфейса.

**Во второй главе** показано, что основной теплофизической характеристикой термоинтерфейса является его тепловое сопротивление, которое в установившемся режиме определяется по формуле:

$$R_S = \frac{\Delta T}{P} \quad (9)$$

где  $\Delta T$  – разность температур;  $P$  – тепловой поток мощности, проходящий через термоинтерфейс.

Для измерения разницы температур на границах слоя термоинтерфейса необходимо установить датчик температуры так, что бы он касался только корпуса полупроводникового прибора максимально близко к термоинтерфейсу и не касался нагреваемого радиатора. Установка температурного датчика таким способом усложняет процесс проверки и вносит погрешность в определение основного теплофизического параметра термоинтерфейса, т.к. часть тепла рассеивается в корпусе полупроводникового прибора до датчика температуры.

При соприкосновении двух проводников различной химической природы из-за разности носителей заряда на внешнем уровне, между разнородными проводниками появляется термоЭДС. Из-за влияния температуры проводника на концентрацию носителей заряда на внешнем уровне, значение электродвижущей силы в данном случае будет напрямую зависеть от температуры:

$$E = (T_2 - T_1) \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}; \quad (10)$$

где  $T_2$  – температура горячего спая;  $T_1$  – температура холодного спая;  $k$  – постоянная Больцмана;  $e$  – заряд электрона;  $n_2$  – концентрация носителей материала радиатора;  $n_1$  – концентрация носителей материала корпуса.

Величина:

$$\frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}$$

является постоянной для двух проводников и называется коэффициент термоЭДС или коэффициент Зеебека и обозначается  $\alpha$ . Формула (10) сокращается до вида:

$$E = (T_2 - T_1) \times \alpha. \quad (11)$$

Выразив  $\Delta T$  из формулы (11) ( $\Delta T = T_2 - T_1$ ) и подставив в формулу (9), получим:

$$R_S = \frac{E}{\alpha \times P}. \quad (12)$$

Для определения зависимости распространения тепла в исследуемом объекте с течением времени, а так же от теплового сопротивления термоинтерфейса, построим математическую модель, в которой два цилиндра радиусом  $R$  и высотой  $L_1$  и  $L_2$  соединены между собой (рисунок 3.а). Нижняя часть цилиндра высотой  $L_1$  в точках А и D нагревается мгновенно до  $100^\circ\text{C}$ , имитируя помещение в кипящую воду. Тепло передаётся к цилиндру с высотой  $L_2$ , а его верхняя часть охлаждается воздухом с температурой, соответствующей нормальным климатическим условиям. В точке контакта цилиндров находится теплопроводящий слой толщиной  $l_s$ , (расстояние  $B_1B_2$  на рисунке 3.а).

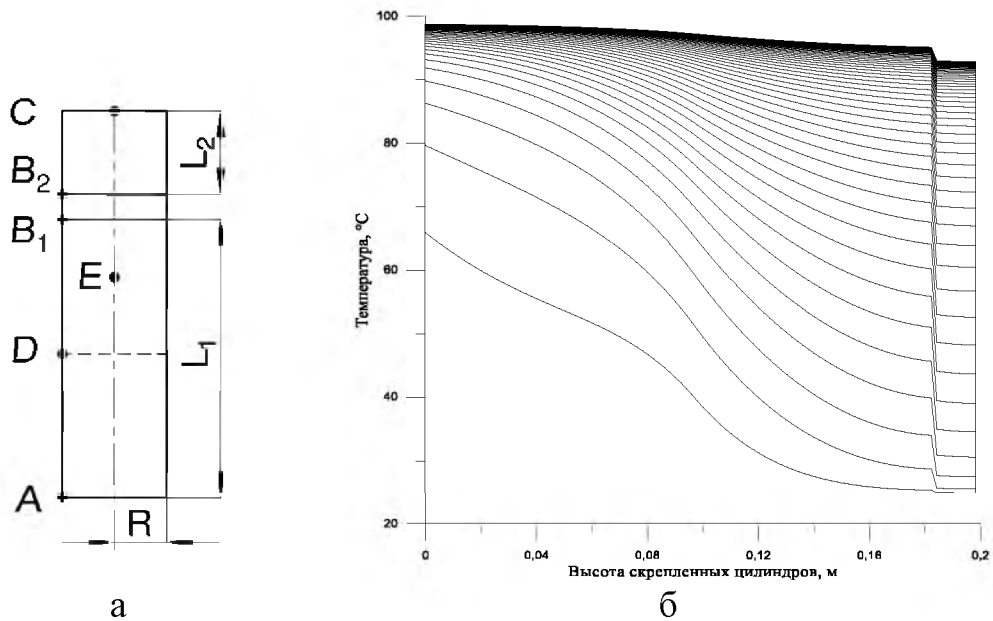


Рисунок 3. Схематическое изображение объекта исследования (а) и температурно-временной срез распределения тепла в цилиндре (б)

Предположения математической модели: контакт между цилиндрами идеальный, коэффициенты теплопроводности веществ не зависят от температуры и являются постоянными, температура кипящей воды постоянна и равна  $100^{\circ}\text{C}$  и тепловое сопротивление в зоне контакта двух цилиндров полностью описывается эффективным тепловым сопротивлением контактного слоя.

Задав параметры цилиндров  $R=25$  мм,  $AC=20$  см,  $AB_1=19,5$  см,  $AE=19$  см,  $AD=9,5$  см, свойства материала цилиндров соответствующие свойствам материала АМг6, свойства материала теплопроводящего слоя – соответствующие свойствам термопасты КПТ-8 с толщиной –  $0,05$  мм по результатам расчётов получим температурный срез (рис.3.б) распространения тепла в цилиндрах с длинами  $L_1$  и  $L_2$ , соединенными через слой термоинтерфейса.

Как видно из полученного температурного среза, эффективное распространение тепла в районе  $0,09$  м ухудшено из-за низкого теплового сопротивления термоинтерфейса по сравнению с тепловым сопротивлением цилиндров. Данная картина наглядно показывает влияние теплового сопротивления термоинтерфейса на отвод тепла.

При изменении удельной теплопроводности термоинтерфейса и его толщины изменяется время установления переходного процесса и максимальная температура (рис.4).

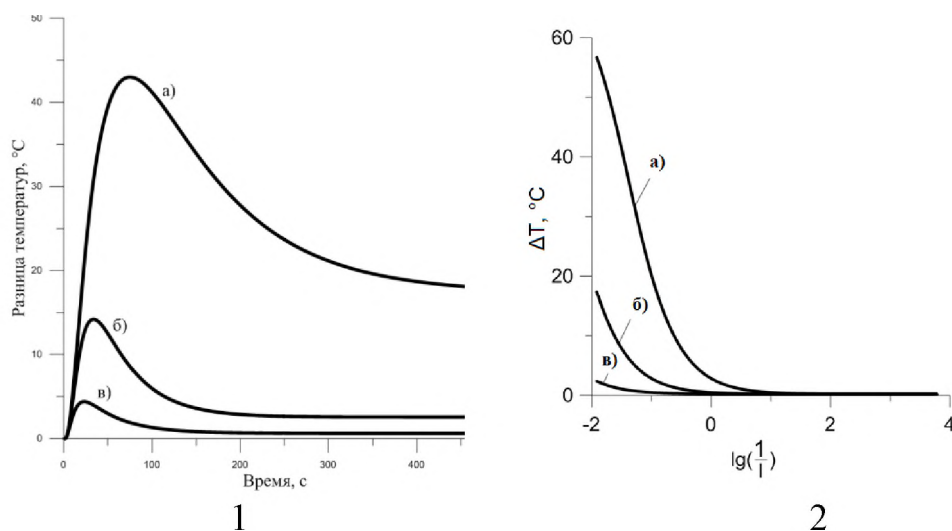


Рисунок 4. График зависимости разницы температур от времени (1) и толщины термопасты (2), а) – удельная теплопроводность термопасты в 10 раз больше номинальной; б) – номинальная удельная теплопроводность; в) – удельная теплопроводность термопасты в 10 раз меньше номинальной

ТермоЭДС носит аperiодический характер и для каждого случая, при увеличении толщины термоинтерфейса наблюдается снижение термоЭДС из-за уменьшения разницы температур на границе слоя термоинтерфейса, вызванного снижением теплового сопротивления.

Результаты теоретического исследования влияния толщины термоинтерфейса на термоЭДС приведены на рис.5.

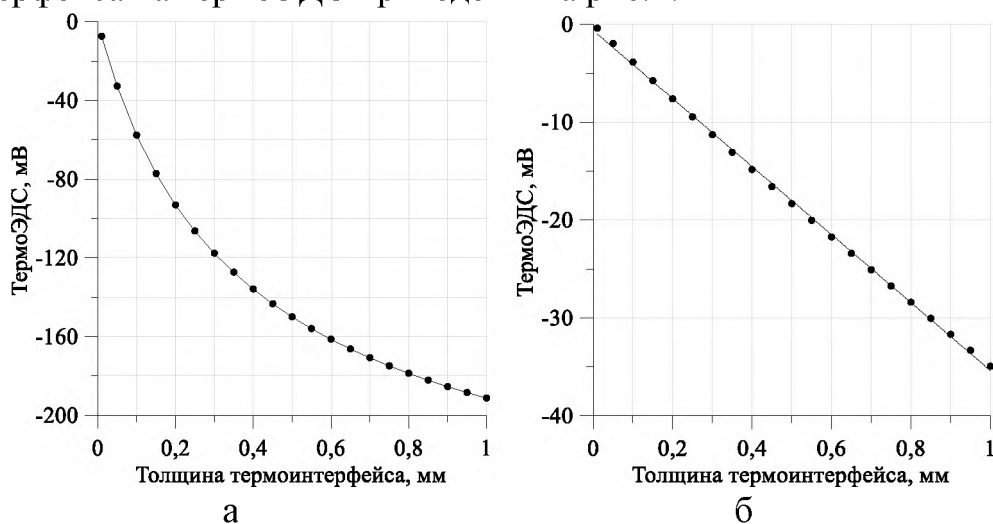


Рисунок 5. График зависимости термоЭДС от толщины слоя термоинтерфейса, а – переходной режим, б – установившийся режим

Изменение термоЭДС в переходном режиме почти в 4 раза больше, чем в установившемся режиме, однако характер зависимости в переходном режиме – нелинейный, а в установившемся – линейный, что делает этот режим более предпочтительным для контроля.

Результаты исследования влияния различных покрытий тепловыделяющего элемента на термоЭДС приведены на рис.6.

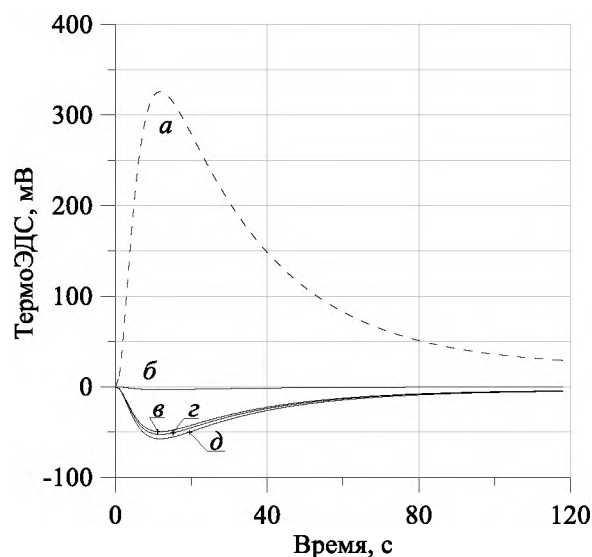


Рисунок 6. График зависимости термоЭДС от времени при толщине термоинтерфейса 0,1 мм между алюминием и медью с покрытием из: а) – никеля, б) – олова, в) – серебра, г) – золота, д) – без покрытия

Из рисунка 6 видно, что по отношению к меди самая большая термоЭДС у никеля. Это вызвано его большим, по отношению к остальным материалам, значением коэффициента Зеебека. Покрытие из олова относительно меди дает самое малое значение термоЭДС из-за его малого коэффициента Зеебека, в данном случае, максимальное значение составило – 3,2 мВ. Остальные покрытия дают схожие результаты из-за схожего значения коэффициента Зеебека.

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям. Для исследования теплофизических характеристик термоинтерфейса с помощью термоЭДС был поставлен эксперимент, в качестве объекта которого являются схожие с математической моделью образцы. Схема эксперимента приведена на рисунке 7.

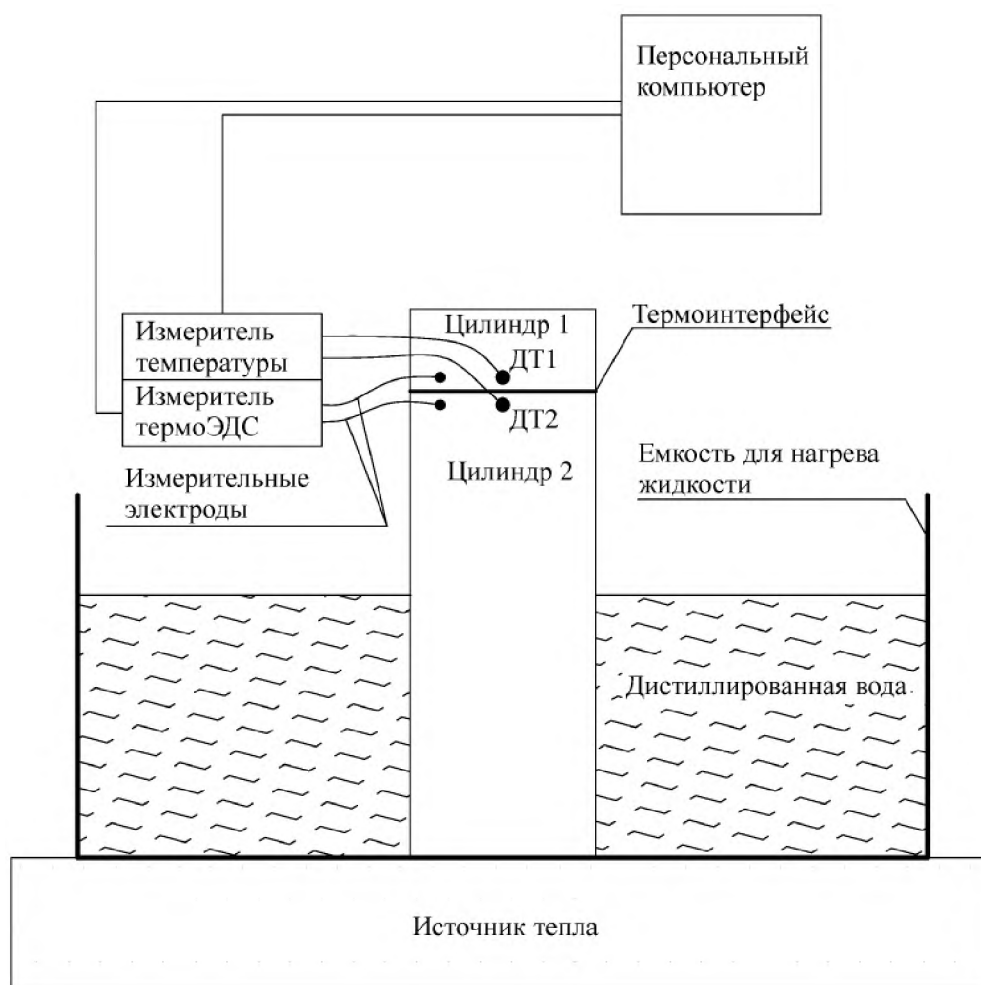


Рисунок 7. Схема эксперимента

Пересчитанное значение разницы температуры из термоЭДС и сравнение его с измеренным значением разницы температуры приведено на рисунке 8. Полученный рисунок наглядно показывает, что разница температуры, вызванная высоким тепловым сопротивлением термоинтерфейса, даже в установившемся режиме превышает потери тепла в окружающую среду. Отклонение двух зависимостей не превышает 6%.

Для исследования зависимости возникающей термоЭДС от теплофизических характеристик термоинтерфейса проведён эксперимент, заключающийся в измерении термоЭДС между алюминиевым радиатором охлаждения в форме цилиндра и закреплённым на нем корпусом ТО-220 силового прибора с термоинтерфейсом в промежуточном слое между ними. Корпус ТО-220 широко распространен в производстве полупроводниковой силовой техники. Материал корпуса – медь, материал покрытия корпуса – олово.

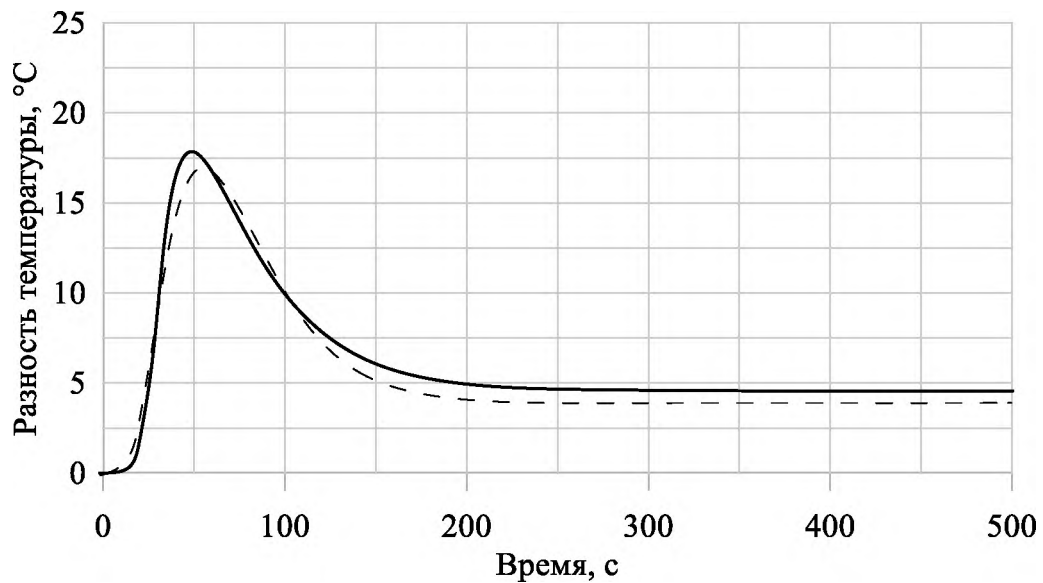


Рисунок 8. Зависимость разности температур на границе термоинтерфейса двух образцов от времени, (сплошная линия – измеренная термопарами, пунктирная линия – измеренная с помощью термоЭДС)

Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой приведена на рисунке 9. На корпус ТО-220 силового элемента и на радиатор через теплопроводящий клей были прикреплены платинородий-платинородиевые термопары ДТ1 и ДТ2 фирмы «Элемер», включенные по дифференциальной схеме. Подключение осуществлялось таким образом, чтобы расстояние от термопары до границы соприкосновения корпуса силового прибора и радиатора охлаждения было минимальным.



Рисунок 9. Схема экспериментальной установки с установкой дополнительных датчиков температуры

Зависимости разницы температур корпуса силового прибора и радиатора, полученные с помощью термопар и с помощью пересчета термоЭДС приведены на рисунке 10.

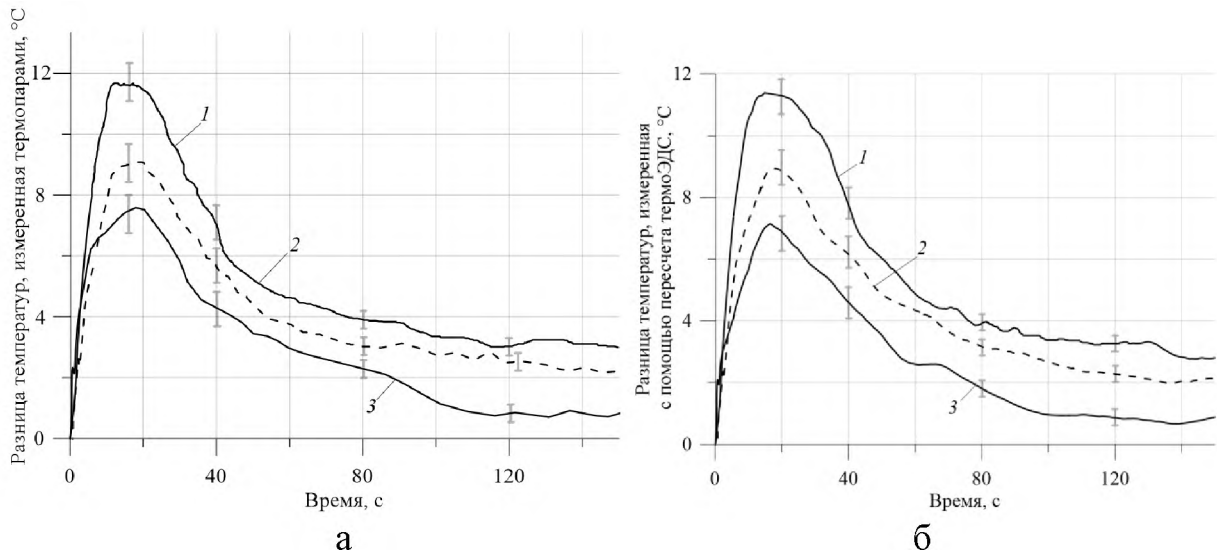


Рисунок 10. Зависимость разницы температур корпуса силового прибора и радиатора охлаждения от времени, полученные с помощью термопар (а) и с помощью пересчета термоЭДС (б), 1 – без термоинтерфейса; 2 – с частично нанесенным термоинтерфейсом (50 %); 3 – с нанесенным термоинтерфейсом

Результаты экспериментальных исследований зависимости термоЭДС от площади покрытия корпуса силового элемента термоинтерфейсом показывают практически линейную зависимость: с увеличением площади покрытия термоЭДС линейно уменьшается (рис. 11). Доверительный интервал не превышает 6 %.

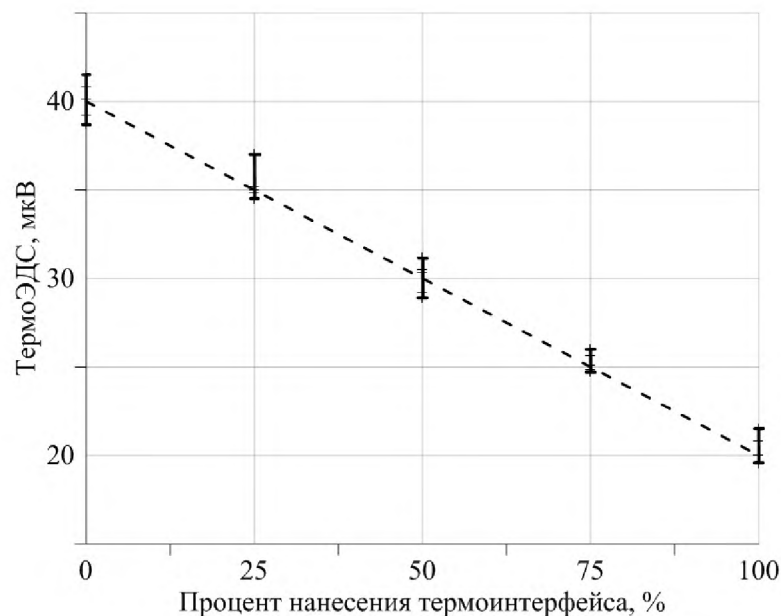


Рисунок 11. График зависимости термоЭДС от площади покрытия корпуса силового элемента термоинтерфейсом

Полученная линейная зависимость термоЭДС от площади покрытия корпуса силового элемента термоинтерфейсом позволяет применять термоэлектрический метод для контроля теплофизических характеристик



термоинтерфейса в промежуточном слое между корпусом силового элемента и радиатором охлаждения. При использовании радиаторов или приборов в корпусах, изготовленных из других материалов, необходимо предварительно определить градуировочную зависимость термоЭДС от площади покрытия корпуса силового элемента термоинтерфейсом. Следует заметить, что термоэлектрический метод контроля можно использовать непосредственно в процессе эксплуатации электронного оборудования.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Для задач неразрушающего контроля теплофизических характеристик термоинтерфейса предложен термоэлектрический метод. Данный метод по сравнению с методом измерения разницы температур с помощью температурных датчиков дает более достоверный результат из-за отсутствия влияния теплового сопротивления термодатчиков при установке на корпус силового прибора и радиатор охлаждения, а также собственной тепловой инерции температурных датчиков.

В диссертации проведено теоретическое исследование влияния теплофизических параметров термоинтерфейса на процесс передачи тепла через границу соприкосновения двух тел. На основе данных исследований получено аналитическое выражение для определения теплового сопротивления между прибором и радиатором.

Предложенный способ контроля теплофизических параметров термоинтерфейса в промежуточном слое между корпусом силового элемента и радиатором охлаждения позволяет контролировать тепловое сопротивление с погрешностью менее 6%. Проведенные исследования выявили основной источник высокой погрешности контроля, заключающийся в примесях материалов исследуемых объектов, флуктуации температуры окружающей среды, а так же высокий электромагнитный фон, характерный для промышленно комплекса, в месте проведения эксперимента.

Лабораторные испытания при применении предложенного метода подтвердили правильность построения математической модели и теоретические обоснования метода.

Практическая эксплуатация разработанного метода контроля теплофизических характеристик термоинтерфейса показала, что разработанная система контроля имеет высокую точность и повторяемость.

### **ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### ***В изданиях рекомендованных ВАК***

1. **Васильев И. М.**, Дементьев А. А., Солдатов А. А., Солдатов, А. И. Термоэлектрический метод контроля качества нанесения теплопроводящего компаунда/ Термоэлектрический метод контроля качества нанесения теплопроводящего компаунда/ И. М. Васильев, А. А. Дементьев, А. А. Солдатов, А. И. Солдатов // Дефектоскопия. – 2020. –№ 5. –С. 28–34..

*В изданиях, индексируемых в SCOPUS и WoS*

2. **Vasil'ev, I.M., Soldatov, A.A., Dement'ev, A.A., Soldatov, A.I.,** Control of Quality of Applying Heat-Conducting Compound / Russian Journal of Nondestructive Testing, 2020, 56(3), стр. 284–290

**Васильев И. М.** Контроль качества нанесения теплопроводящего компаунда/ И. М. Васильев, А. А. Дементьев, А. А. Солдатов, А. И. Солдатов // Дефектоскопия. – 2020. – № 3. – С. 65–71.

3. **Vasiliev, I.M., Soldatov, A.I., Abouellail, A.A., Kostina M.A., Soldatov A.A., Soldatov, D.A., Bortalevich, S.** Thermoelectric Quality Control of the Application of Heat-Conducting Compound \ Studies in Systems, Decision and Control, 2021, 351, pp. 59–68

*Прочие публикации*

4. **Vasiliev I. M.** Automatic device for testing thermal resistance with thermoelectric effect/ I. M. Vasiliev, A. I. Soldatov, A. A. Dementiev, A. A. Soldatov and A Abouellaill/ Material Science Forum. –2020. –№4.– P. 154–156.

5. **Васильев И. М.** Теоретическое и экспериментальное исследование теплопереноса с учетом контактного термического сопротивления/ И. М. Васильев, А. А. Дементьев // Решетневские чтения – 2019: сборник материалов XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева.– Красноярск, 2019. – С. 213-215.

6. **Васильев И. М.** Метод определения качества нанесения теплопроводящего компаунда с помощью термоЭДС/ И. М. Васильев, А. И. Солдатов // Инноватика – 2019: сборник материалов XV Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.– Томск, 2019. – С. 174-177.

7. **Васильев И. М.** Исследование теплового сопротивления термоэлектрическим методом / И. М. Васильев // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов.– Новосибирск, 2019. – С. 144-148.

8. XX Научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства», г. Томск, 2020 г. Электронные и электромеханические системы и устройства : сб. науч. тр. Томск : 2020. С.– полус

9. **Васильев И. М.** Автоматизированная установка для исследования теплового сопротивления термоэлектрическим методом/ Васильев И. М., Солдатов А.И., Солдатов А.А., Дементьев А.А // Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции: сборник материалов III Международного форума, 2020. С. 32-34.

10. **Васильев И. М.** Автоматизированная установка для исследования теплового сопротивления термоэлектрическим методом // И. М. Васильев, А. И. Солдатов // Научная сессия ТУСУР – 2020: сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.– Томск, 2020. – С. 142–144.

11. **Васильев И. М.** Исследование теплового сопротивления термоэлектрическим методом / И. М. Васильев, А. А. Дементьев // Электронные

и электромеханические системы и устройства: материалы XX научно-технической конференции. – Томск, 2020. – С. 43–45.

### *Патенты*

1. Пат. 2687300 Российская Федерация, МПК G01R 31/26. Устройство для измерения теплового сопротивления между корпусом полупроводникового прибора и радиатором охлаждения / Солдатов А. И., Солдатов А. А., Васильев И. М., Шульгина Ю. В., Костина М. А., Сорокин П. В. №2018131965. Заявл. 05.09. 2018; опубл. 13.05. 2019.

2. Пат. 2 686 859 Российская Федерация, МПК G01R 31/26, G01N 25/18, G01N 27/18. Способ измерения теплового сопротивления между корпусом полупроводникового прибора и радиатором охлаждения / Солдатов А. И., Солдатов А. А., Васильев И. М., Шульгина Ю. В., Костина М. А., Сорокин П. В. № 2018131969. Заявл. 05.09. 2018; опубл. 06.05. 2019.