

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 536.581.3

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ТЕРМОИНТЕРФЕЙСОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

© 2026 г. А. А. Галиуллин^{a,b,*}, К. А. Бажанов^a, Д. А. Матиенко^a,
К. А. Досов^c, А. Ю. Кунцевич^{a,b}

^aНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”

Россия, 101000, Москва, Мясницкая, д. 20

^bФизический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

^cРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

Россия, 125047, Москва, Миусская пл., 9

* E-mail: 1233550v@mail.ru

Поступила в редакцию 30.04.2026

После доработки 03.09.2026

Принята к публикации 24.09.2026

Представлены конструкция и методика работы аппаратно-программного комплекса для исследования полного термического сопротивления слоя термоинтерфейсных материалов и оценки их эффективной теплопроводности в условиях стационарного теплового потока по стандарту ASTM D5470. Для снижения инструментальной погрешности использованы термисторы в связке с 16-битными аналого-цифровыми преобразователями, обеспечивающие температурную дискретность до 3 мК, и симметричная четырехканальная система тензометрии. Установка реализует два взаимодополняющих режима измерений: оценку объемной теплопроводности по зависимости теплового импеданса от зазора при больших зазорах и анализ полного термического сопротивления слоя при заданном контактном давлении. Максимальное давление в проведенных экспериментах составило около 0.063 МПа при площади контакта 30 см². Выравнивание контактных поверхностей обеспечивается двухосевым гониометром с контролем по сминаемому калибром. Работоспособность комплекса продемонстрирована для коммерческих термоинтерфейсных материалов.

Ключевые слова: термоинтерфейсные материалы, ASTM D5470, термическое сопротивление, теплопроводность, NTC-термисторы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Миниатюризация и рост плотности рассеиваемой тепловой мощности в современной электронике делают критически важной задачу отвода тепла. Для ее решения необходимо снижать полное термическое сопротивление слоя между микроэлектронными элементами и радиаторами. Основным способом минимизации этого сопротивления является применение

термоинтерфейсных материалов (ТИМ) – термопастов, фазопереходных материалов и эластомеров. Общепринятым мировым стандартом для определения теплопроводности (k) и термического сопротивления (R_{th}) таких материалов выступает стационарный метод ASTM D5470 [1], основанный на законе Фурье для одномерного теплового потока между двумя эталонными металлическими стержнями. В России в настоящее время отсутствует национальный стандарт для измерения термического сопротивления термоинтерфейсных материалов, а серийные отечественные установки такого класса, насколько нам известно, не выпускаются.

Коммерческие установки, реализующие метод ASTM D5470, обеспечивают высокую точность за счет применения вакуумных камер, активных тепловых экранов и прецизионной гидравлики. Их высокая стоимость стимулировала разработку бюджетных лабораторных аналогов [2, 3]. Подобные компактные решения, как правило, дают значительно менее точные результаты, определяющиеся приборными ограничениями.

Первое ограничение связано с точностью измерения температур. Как показано в работе [4], до 70 % суммарной неопределенности метода ASTM D5470 возникает из-за погрешности температурных датчиков. Использование термопар становится неприемлемым при малых градиентах. Решением, предложенным в работе [5], является переход на прецизионные термисторы, что снижает температурную погрешность на порядок.

Второе ограничение связано с определением эффективной толщины слоя ТИМ *in situ* под действием контактного давления. Значения этой толщины зачастую составляют менее 100 мкм. В работе [6] показано, что при больших контактных давлениях упругая деформация несущих элементов испытательного стенда (механическая податливость) может становиться сопоставимой с толщиной измеряемого образца, что приводит к некорректному измерению расчетной толщины и, как следствие, вычисляемой теплопроводности k .

Кроме того, электротепловое моделирование, проведенное инженерами компании Intel [7], показывает, что в реальных условиях применения метода из-за макроскопического искривления поверхностей кристаллов и теплораспределителей понятие “глобальной толщины слоя” теряет физический смысл. Поэтому для практической оценки, наряду с объемной теплопроводностью k , целесообразно анализировать непосредственно измеряемое методом *in situ* полное термическое сопротивление слоя R_{paste} при заданном контактном давлении [8].

В настоящей работе представлена конструкция аппаратно-программного комплекса, собираемого из коммерчески доступных и 3D-печатных компонентов. Особое внимание уделено

– снижению ошибки непараллельности с помощью гониометрической платформы;

- повышению температурной дискретности до $0.003\text{ }^{\circ}\text{C}$ за счет термисторов с отрицательным температурным коэффициентом (NTC) и 16-битных АЦП;
- реализации двухрежимного протокола измерений, в котором объемная теплопроводность k оценивается при больших зазорах, а полное термическое сопротивление слоя R_{paste} анализируется при заданном контактном давлении.

2. КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

2.1. Механическая архитектура и система выравнивания

Основным источником макроскопической погрешности метода ASTM D5470 является непараллельность контактирующих поверхностей, приводящая к неравномерному распределению давления и образованию воздушных зазоров. Для решения этой проблемы мы применяем узел юстировки (рис. 1).

Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования термоинтерфейсных материалов под давлением...

Несущий каркас установки выполнен из жесткого алюминиевого профиля. Вертикальное перемещение нижнего измерительного узла осуществляется с помощью микрометрического -позиционера. На платформе позиционера закреплен двухосевой гониометр. Настройка параллельности поверхностей медных измерительных блоков проводится перед началом серии экспериментов с использованием сминаемых калибров – метода, применяемого в трибологии для контроля микронных зазоров.

Над гониометром симметрично установлены четыре тензометрических датчика балочного типа номиналом 5 кг каждый. Использование четырех разнесенных датчиков вместо одного центрального предотвращает возникновение паразитных перекосов и моментов сил при сжатии образца. На тензодатчиках через теплоизолирующую полимерную переходную пластину закреплен жидкостный теплообменник (водоблок), охлаждаемый внешним чиллером с поддержанием постоянной температуры воды 20°C . К водоблоку приклеен (на теплопроводный клей) нижний медный измерительный стержень. Верхний медный стержень жестко связан с неподвижной рамой через термоизолятор и оснащен блоком из четырех патронных нагревателей с максимальной мощностью 400 Вт, управляемой посредством широтно-импульсной модуляции.

Для измерения зазора оптический энкодер с паспортным разрешением 1 мкм закреплен на неподвижных боковых направляющих профиля, а его считывающая головка связана с переходной пластиной, расположенной между тензодатчиками и водоблоком. Такая схема позволяет регистрировать перемещение измерительного узла при работе с большими зазорами.

При переходе к тонким слоям и повышенному контактному давлению абсолютное значение зазора становится менее надежной метрикой, поэтому в дальнейшем используется разделение на режим оценки объемной теплопроводности и режим анализа R_{paste} при заданном давлении, см. разд. 3.

2.2. Измерительная электроника и температурная дискретность

NTC-термисторы сопротивлением 100 кОм, аналогичные применяемым в узлах экструдера 3D-принтера Ender-3 S1, были интегрированы в медные блоки [5]. Датчики вклеены в отверстия теплопроводным клеем с шагом 15 мм, ближайший к границе раздела датчик расположен на расстоянии 3 мм от поверхности.

Электронная подсистема построена по двухуровневой архитектуре (рис. 2): микроконтроллер Arduino выполняет функции низкоуровневого сбора данных, а преобразование данных осуществляется на персональном компьютере программой, написанной на языке Python.

Рис. 2. Блок-схема аппаратно-программного комплекса.

Для оцифровки сигналов термисторов, включенных в прецизионный делитель напряжения ($V_{in} = 5.0$ В, $R_f = 47$ кОм), используются 16-битные АЦП ADS1115 в режиме усиления GAIN_TWOTHIRDS с диапазоном ± 6.144 В. Младший разряд АЦП соответствует напряжению $\Delta V_{LSB} \approx 0.187$ мВ. Пересчет измеренного сопротивления термисторов R_{NTC} в температуру осуществляется по индивидуально откалиброванному трехпараметрическому уравнению Стейнхарта–Харта:

$$\frac{1}{T} = A_i + B_i \ln(R_{NTC}) + C_i (\ln R_{NTC})^3,$$

где коэффициенты A_i , B_i , C_i определены калибровкой по трем точкам (0 °С, 25 °С, 100 °С). Дифференцирование данной функции по коду АЦП показывает, что достигнутая теоретическая температурная дискретность установки составляет около 3 мК/бит при комнатной температуре и около 23 мК/бит при 100 °С, что на порядок превышает возможности стандартных модулей для термопар.

2.3. Алгоритмы фильтрации и детектирования стационарного режима

Подсистема тензометрии опрашивает четыре канала HX711. Для устранения случайных выбросов применяется медианный фильтр с окном в 3 отсчета. После тарировки сигналы четырех датчиков суммируются, а затем пересчитываются в контактное давление:

$$P = F/A, \quad A = 3000 \text{ мм}^2.$$

При площади контакта 3000 мм² общий диапазон измеренных контактных давлений составил 0.0009–0.063 Мпа, а сопоставимый диапазон, в котором представлены все три материала, составляет примерно 0.006–0.053 МПа. Эти значения относятся к низко- и средненагруженным режимам прижима, они сопоставимы по порядку величины с условиями работы термоинтерфейсов в прикладных узлах охлаждения электронной техники.

Ввиду высокой теплоемкости измерительных медных блоков достижение абсолютного теплового равновесия системы может занимать более часа. Однако, как уже было показано в работе [9], градиент температур и измеряемое термическое сопротивление R_{paste} стабилизируются значительно быстрее.

В разработанном программном обеспечении применена двухконтурная фильтрация скользящим средним. Короткое окно (5 с) используется для подавления высокочастотного электронного шума, а длинное окно (100 с) – для детектирования стационарного состояния. Критерием выхода на квазистационарный режим считается флуктуация вычисляемых тепловых потоков q не более чем на $\pm 3\%$ в течение минуты. Анализ данных показал, что применение данного алгоритма позволяет надежно фиксировать измерительную точку в среднем через 5–7 мин после изменения мощности нагревателя или контактного давления.

3. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ДВУХРЕЖИМНЫЙ ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Расчет тепловых потоков и экстраполяция температур

Вычисление теплофизических характеристик базируется на законе Фурье для стационарного одномерного теплового потока. Программный комплекс непрерывно рассчитывает тепловые потоки, проходящие через верхний (q_{12}) и нижний (q_{34}) медные измерительные блоки, используя программно усредненные значения температур:

$$q_{12} = k_{\text{Cu}} A \frac{T_1 - T_2}{L_{12}},$$

$$q_{34} = k_{\text{Cu}} A \frac{T_3 - T_4}{L_{34}},$$

где k_{Cu} – табличное значение теплопроводности меди измерительных блоков, A – площадь поперечного сечения блоков, T_1 – T_4 – температуры, измеряемые термисторами, а L_{12} и L_{34} – расстояния между посадочными отверстиями термисторов в верхнем и нижнем блоках соответственно ($L_{12}=L_{34}=15$ мм).

Поскольку прямое измерение температуры на границе раздела сред невозможно без возмущения теплового поля датчиками, температуры поверхностей контакта ($T_{\text{surf,top}}$ и $T_{\text{surf,bottom}}$) вычисляются линейной экстраполяцией (рис. 3):

$$T_{\text{surf,top}} = T_2 - \frac{q_{12}D_{2,\text{surf}}}{k_{\text{Cu}}A},$$

$$T_{\text{surf,bottom}} = T_3 + \frac{q_{34}D_{3,\text{surf}}}{k_{\text{Cu}}A},$$

где $D_{2,\text{surf}}$ и $D_{3,\text{surf}}$ – расстояния от ближайших термисторов до контактных площадок (3 мм).

Рис. 3. Схематическое распределение температур вдоль измерительных блоков и принцип линейной экстраполяции к контактным поверхностям ($T_{\text{surf,top}}$ и $T_{\text{surf,bottom}}$)

Искомое полное термическое сопротивление слоя R_{paste} [К/Вт], включающее в себя как объемное сопротивление самого материала, так и сопротивления на обеих границах раздела, определяется следующим образом:

$$R_{\text{paste}} = \frac{T_{\text{surf,top}} - T_{\text{surf,bottom}}}{q_{\text{paste}}},$$

где q_{paste} – эффективный тепловой поток через образец.

3.2. Компенсация расхождения тепловых потоков и мультипликативной погрешности

Отсутствие вакуумной камеры и активных компенсирующих нагревателей приводит к радиационно-конвективным потерям и, как следствие, к расхождению тепловых потоков, рассчитанных по верхнему и нижнему измерительным блокам. Анализ экспериментальных данных показал, что в основной группе рабочих режимов относительное расхождение потоков составляет порядка 30–40 %, тогда как при малых мощностях нагревателя наблюдаются отдельные точки с меньшим расхождением (рис. 4).

Рис. 4. Зависимость относительного расхождения тепловых потоков, рассчитанных по верхнему и нижнему измерительным блокам, от температуры верхнего блока T_1 при различных мощностях нагревателя

Для приближенной компенсации расхождения тепловых потоков в метрологической практике при работе с аналогичными установками [10, 11] эффективный тепловой поток через образец принимается равным среднему арифметическому:

$$q_{\text{paste}} = \frac{q_{12} + q_{34}}{2}.$$

Такое усреднение используется как компенсация первого порядка: при монотонном уменьшении теплового потока вдоль измерительной цепочки эффективный поток через зону термоинтерфейса оценивается значением между q_{12} и q_{34} . Эта процедура не устраняет абсолютную систематическую погрешность, но позволяет согласованно сравнивать материалы при неизменной геометрии установки.

Источником небольшой систематической неопределенности является значение теплопроводности меди k_{Cu} , заложенное в расчет, оно может варьироваться в пределах нескольких процентов из-за наличия примесей и технологической обработки. Отметим, что при неизменной геометрии измерений данная установка обеспечивает прецизионную точность для относительного анализа термоинтерфейсных материалов.

3.3. Двухрежимный измерительный протокол

С учетом различных значений достоверности показаний энкодера при больших и малых зазорах используется двухрежимный протокол тестирования.

3.3.1. Режим оценки объемной теплопроводности. Он применяется при больших зазорах, когда толщина слоя d (bond line thickness, BLT) больше или порядка **500** мкм, и малых контактных давлениях. В этом режиме показания оптического энкодера считаются достоверными, а объемная теплопроводность материала определяется по наклону зависимости $R_{paste}(d)$, как описано ниже в разд. 4. Данный режим используется для сравнительного скрининга вязких паст, компаундов и эластомеров.

3.3.2. Режим анализа при заданном контактном давлении. Он применяется при контролируемом прижиге в диапазоне $P = 0.0009\text{--}0.063$ МПа. В данном режиме абсолютная толщина слоя по показаниям энкодера не используется как основная расчетная величина, поскольку при малых зазорах и ненулевой нагрузке она может зависеть от нуля энкодера, а также непараллельности и механической податливости узлов установки. В соответствии с современными тенденциями [8] основной метрикой термоинтерфейса является полное термическое сопротивление слоя R_{paste} как функция контактного давления P . Этот режим позволяет напрямую сравнивать эффективность термоинтерфейсов в условиях контролируемого прижима, типичных для эксплуатации, например процессоров.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ КОМПЛЕКСА

Для тестирования аппаратно-программного комплекса была проведена серия сравнительных испытаний трех коммерческих термоинтерфейсных материалов, далее обозначенных как TIM-1, TIM-2 и TIM-3. Материалы различались значениями заявленной теплопроводности и реологическим поведением, что позволяло проверить способность

установки различать образцы с разными уровнями полного термического сопротивления слоя R_{paste} . Конкретные торговые наименования в настоящей работе не приводятся, поскольку основной целью является демонстрация возможностей измерительного стенда, а не сравнительное исследование коммерческих продуктов.

4.1. Анализ объемной теплопроводности

В режиме больших зазоров показания энкодера использовались как оценка толщины слоя d . Объемная теплопроводность материалов k_{paste} определялась по наклону линейной зависимости полного термического сопротивления слоя от толщины:

$$R_{\text{paste}} = R_0 + sd.$$

Здесь величина d выражена в микрометрах, а наклон s имеет размерность $\text{K}/(\text{Вт} \cdot \text{мкм})$. Тогда при площади контакта $A = 0.003 \text{ м}^2$ объемная теплопроводность вычисляется как

$$k_{\text{paste}} = \frac{10^{-6}}{sA}.$$

Рис. 5. Зависимость полного термического сопротивления слоя R_{paste} от толщины слоя d в режиме больших зазоров.

Результаты линейной аппроксимации приведены в табл. 1. Для TIM-1 и TIM-3 использовано 7 и 9 точек соответственно; для TIM-2 доступно только 3 точки, поэтому оценка его теплопроводности имеет меньшую надежность, несмотря на высокое значение R^2 .

Таблица 1. Параметры линейной аппроксимации зависимости $R_{\text{paste}}(d)$ и оценка объемной теплопроводности коммерческих материалов

Материал	N	Диапазон d , мкм	$s \cdot 10^5$, $\text{K}/(\text{Вт} \cdot \text{мкм})$	k , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$	R^2
TIM-1	7	630–2277	5.879	5.670	0.965
TIM-2	3	202–1882	20.364	1.637	0.998
TIM-3	9	639–2531	5.542	6.014	0.999

Полученные значения демонстрируют ожидаемое различие между коммерческими материалами. Наибольшая оцененная объемная теплопроводность получена для TIM-3 ($k \approx 6.01 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$), близкое значение показал TIM-1 ($k \approx 5.67 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$), тогда как TIM-2 характеризуется существенно меньшей теплопроводностью ($k \approx 1.64 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$). Таким образом, в режиме больших зазоров установка корректно воспроизводит ранжирование материалов с существенно различающимися значениями теплопроводности.

4.2. Анализ термического сопротивления под нагрузкой

Режим анализа при контактном давлении позволяет оценивать изменение полного термического сопротивления слоя R_{paste} в условиях контролируемого прижима без использования толщины слоя как основной расчетной переменной. В проведенной серии полный диапазон давления P составил 0.0009–0.063 МПа, а сопоставимый диапазон, в котором представлены все три материала, составил приблизительно 0.006–0.053 МПа. На рис. 6 представлены зависимости R_{paste} от контактного давления P .

Рис. 6. Зависимость полного термического сопротивления слоя R_{paste} от контактного давления P для трех коммерческих термоинтерфейсных материалов

Для всех трех материалов наблюдается снижение величины R_{paste} при увеличении P , что соответствует ожидаемому улучшению заполнения микронеровностей и уменьшению вклада сопротивлений на границах раздела. TIM-1 демонстрирует минимальное сопротивление во всем исследованном диапазоне: минимальное измеренное значение составляет $R_{\text{paste}} \approx 0.0055$ К/Вт при $P \approx 0.061$ МПа. С TIM-2 имеет наибольшее сопротивление среди рассмотренных материалов. TIM-3 занимает промежуточное положение: при $P \approx 0.04$ МПа его сопротивление составляет около 0.0096 К/Вт, что примерно в 1.55 раза выше, чем у TIM-1, и примерно в 6.18 раза ниже, чем у TIM-2. Полученный результат подтверждает, что аппаратно-программный комплекс способен выявлять различия между термоинтерфейсными материалами как в режиме оценки объемной теплопроводности, так и в режиме контролируемого прижима.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан, сконструирован и протестирован аппаратно-программный комплекс для исследования теплофизических характеристик термоинтерфейсных материалов по методу стационарного теплового потока ASTM D5470. Реализовано два режима измерений: оценка объемной теплопроводности по линейной зависимости полного термического сопротивления слоя R_{paste} от толщины d при больших зазорах и сравнительный анализ полного теплового сопротивления при заданном контактном давлении. В проведенных экспериментах максимальное давление составило около 0.063 МПа. На трех коммерческих термоинтерфейсных материалах показано, что комплекс различает материалы как по оцененной объемной теплопроводности ($k \approx 1.64\text{--}6.01$ Вт/(м · К)), так и по зависимости полного термического сопротивления слоя от контактного давления. В режиме контролируемого прижима для всех трех материалов наблюдалось снижение значения R_{paste} с ростом P , что соответствует ожидаемому улучшению заполнения микронеровностей. Предложенные конструктивные и алгоритмические решения могут быть использованы при

создании недорогих лабораторных стендов для сравнительной оценки теплопроводности и полного термического сопротивления термоинтерфейсов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

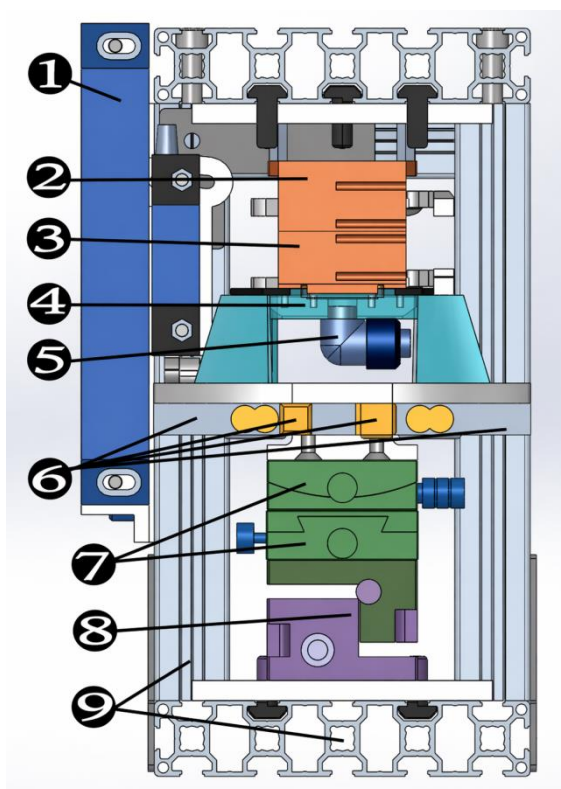
Работа выполнена при поддержке научного фонда Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики” в рамках программы "Структуры из двумерных материалов для электронных применений" (проект № 26-00-042 НУТ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

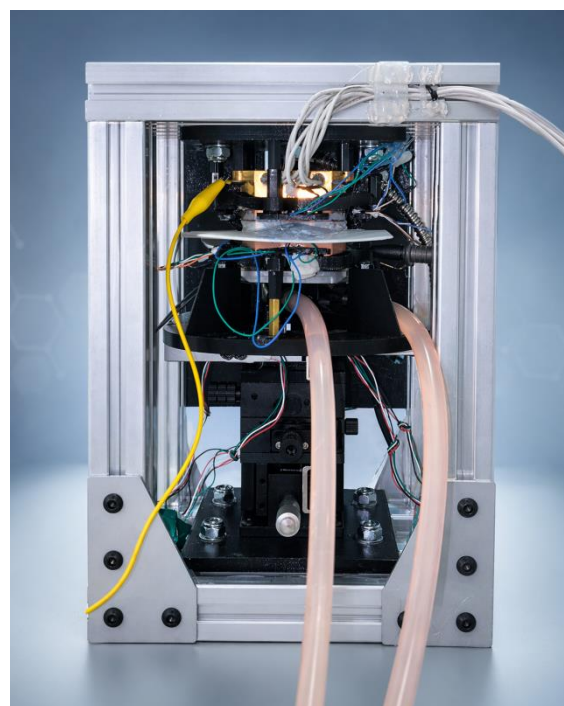
1. ASTM D5470-17: Standard Test Method for Thermal Transmission Properties of Thermally Conductive Electrical Insulation Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
2. Joshi C., Milam C., Russ C., Pierson S., Hu H., Sun Y. ASEE Midwest Section Conference. 2024. P. 1009. <https://doi.org/10.18260/1-2-1139-49352>
3. Quddus H.A., Yarbrough L.J., Batchelor M.E., Roy C. ASEE Southeast Conference. 2025. P. 975. <https://doi.org/10.18260/1-2--54142>
4. AboRas M., May D., Schachtel R. et al. IEEE ITherm. 2014. P. 1285. <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2014.6892429>
5. Kempers R., Kolodner P., Lyons A., Robinson A.J. Rev. Sci. Instrum. 2009. V. 80. № 9. P. 095111. <https://doi.org/10.1063/1.3193715>
6. Smith R.A., Culham R.J. Semiconductor Thermal Measurement and Management. 21st Annual IEEE Symposium (SEMI-THERM), San Jose, USA, 2005. P. 53. <https://doi.org/10.1109/STHERM.2005.1412159>
7. Shia D., Yang J. Microelectron. J. 2021. V. 112. P. 105058. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2021.105058>
8. Chen J., Liu J., Xu X., Liu K., Wang Z. Appl. Therm. Eng. 2024. V. 239. P. 122104. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122104>
9. Ishida Y., Ryoson H., Ota T., Yazawa K. Proc. ASME 2009 InterPACK Conference. 2009. P. 89239. <https://doi.org/10.1115/InterPACK2009-89239>
10. Burg B.R., Kolly M., Blasakis N., Gschwend D., Zürcher J. Rev.Sci. Instrum. 2015. V. 86. № 12. P. 124903. <https://doi.org/10.1063/1.4936766>
11. Feng B., Tu J., Zhang Y.-H., Fan L.-W., Yu Z.-T. Appl. Therm. Eng. 2020. V. 171. P. 114931. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114931>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Экспериментальная установка для исследования термоинтерфейсных материалов под давлением: **а** – схема поперечного сечения установки, **б** – фотография экспериментального стенда: 1 – оптический энкодер, 2 – медный блок для нагрева, 3 – медный блок для охлаждения, 4 – водоблок для охлаждения, 5 – фитинг для воды, 6 – тензодатчик, 7 – гониометр, 8 – Z-подвижка, 9 – рама из алюминиевого профиля
- Рис. 2.** Блок-схема аппаратно-программного комплекса. Стрелками показаны пути прохождения сигналов от термисторов и тензодатчиков, а также уровни применяемой математической фильтрации
- Рис. 3.** Схематическое распределение температур вдоль измерительных блоков и принцип линейной экстраполяции к контактным поверхностям ($T_{\text{surf,top}}$ и $T_{\text{surf,bottom}}$). Толщина слоя ТИМ на рисунке условно увеличена для наглядности
- Рис. 4.** Зависимость относительного расхождения тепловых потоков, рассчитанных по верхнему и нижнему измерительным блокам, от температуры верхнего блока T_1 при различных мощностях нагревателя
- Рис. 5.** Зависимость полного термического сопротивления слоя R_{paste} от толщины слоя d в режиме больших зазоров. Точки соответствуют экспериментальным данным, линии – линейной аппроксимации, используемой для оценки объемной теплопроводности материалов
- Рис. 6.** Зависимость полного термического сопротивления слоя R_{paste} от контактного давления P для трех коммерческих термоинтерфейсных материалов



(a)



(б)

Рис. 1.

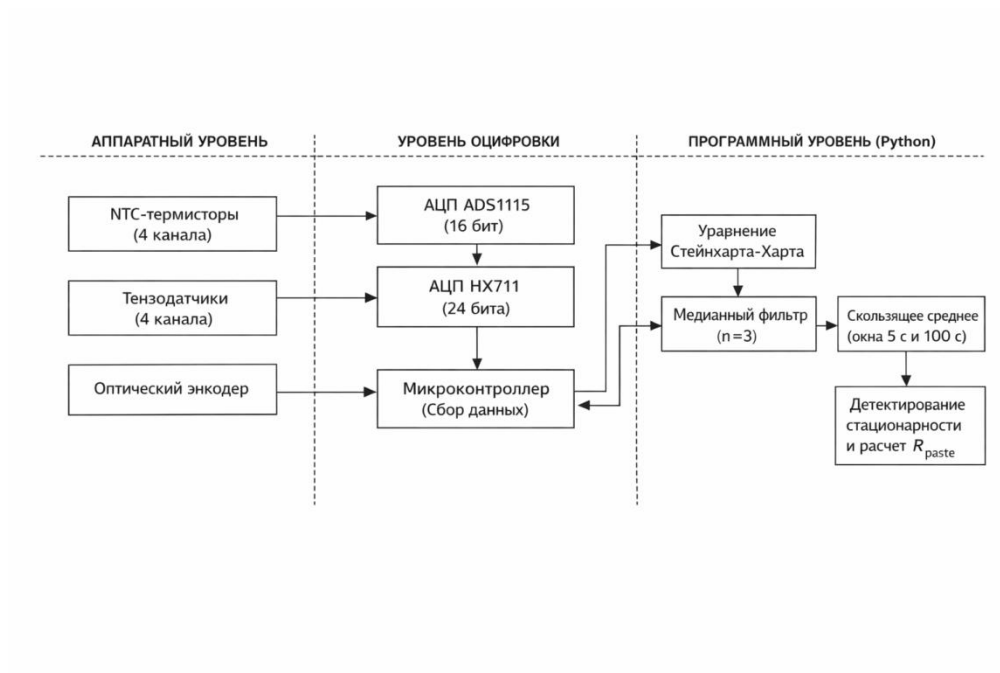


Рис. 2.

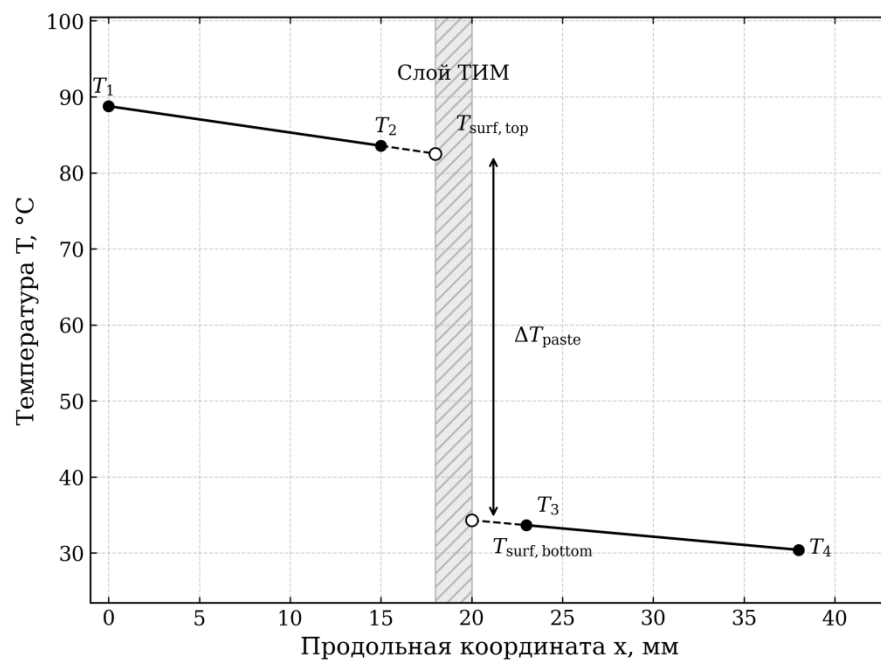


Рис. 3.

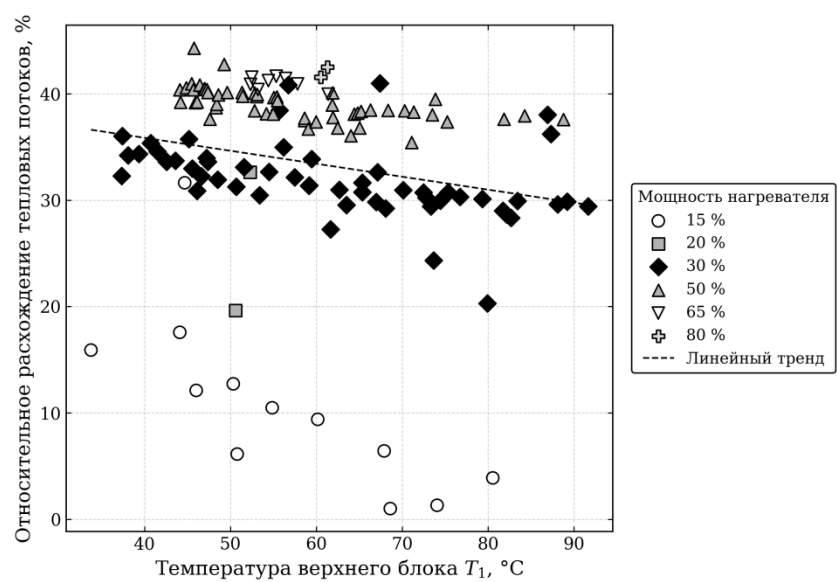


Рис. 4.

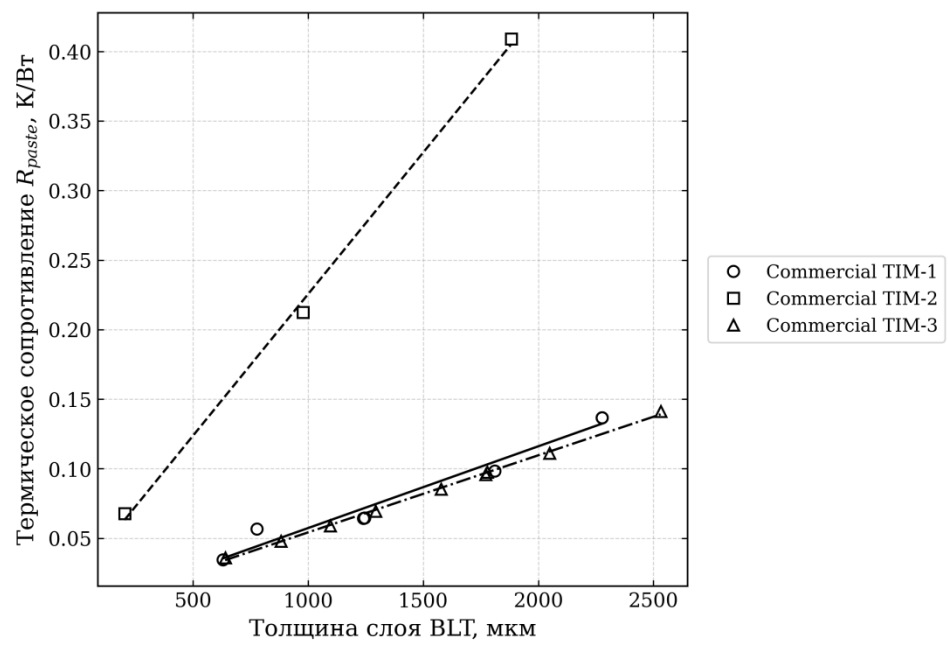


Рис. 5.

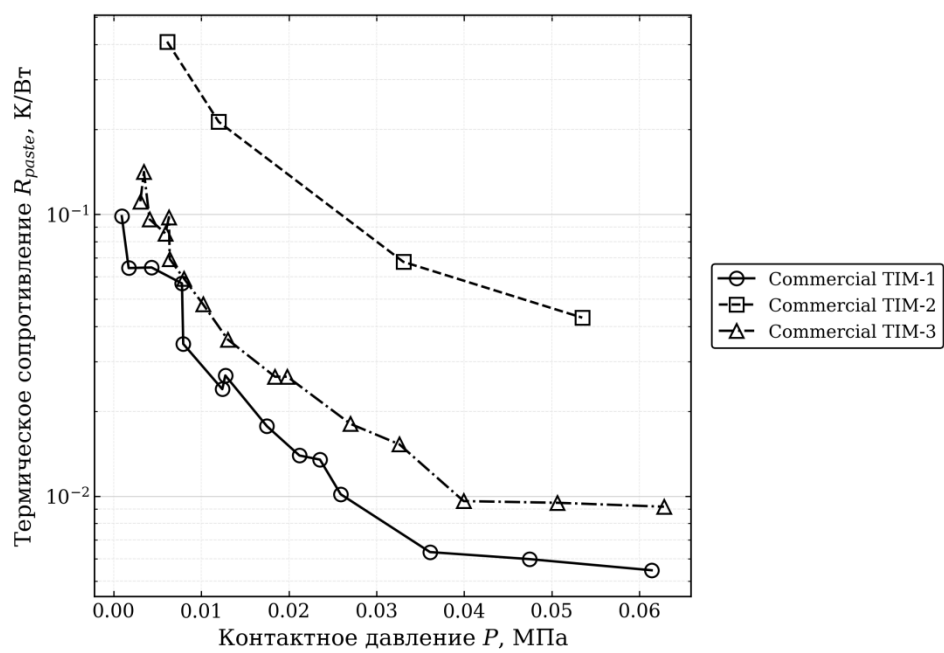


Рис. 6.