

Омметр «Режим-1» для исследования теплофизических свойств веществ и материалов в покое и в потоке

Д. С. Симанков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия
pegasds1@mail.ru

Аннотация. Разработан высокоточный омметр, подающий прямоугольные импульсы на подключенные к нему термодатчики разной конструкции. Во время разогревающего импульса электрическое сопротивление датчика (датчиков) снимается с заданной частотой. По известным моделям расчетным путем вычисляют теплофизические свойства (ТФС) изучаемых объектов. На оборудовании можно реализовать абсолютный и относительный методы измерений. Измерения проводятся в одном импульсе. Оценена неопределенность измеряемых вольт-амперных характеристик канала измерения. Эксперименты проведены с кожей человека с использованием платиновых термометров сопротивления Pt100 малого размера на подложке. Благодаря современным датчикам на подложке с покрытием расширяется применение устройства для неразрушающего исследования ТФС (теплопроводность, тепловая активность, температуропроводность, температура кипения и плавления) на токопроводящие и магнитопроводящие объекты измерения, а за счет малого размера датчика исследования можно проводить на малых объемах. От датчика зависит диапазон измеряемых температур, как и диапазон давлений в опытах. Благодаря компактности устройства его можно применять в промышленности для сред в ламинарном потоке либо в лабораторном практикуме для студентов. Устройство может быть использовано для изучения ТФС пластичных аморфных и сыпучих материалов, биологических и растительных объектов, жидкостей и газов, их смеси, твердых тел, неоднородных по структуре тел с плавящимся компонентом или без него. Благодаря иррегулярному тепловому режиму при помощи теплового поля можно изучать быстропотекающие и/или необратимые процессы.

Ключевые слова: омметр, теплофизические свойства, жидкость, газ, твердое тело, аморфные тела, МБО, растительные объекты, термодатчик, химические процессы, иррегулярный тепловой режим

Для цитирования: Симанков Д. С. Омметр «Режим-1» для исследования теплофизических свойств веществ и материалов в покое и в потоке // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 6. С. 5–19. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-5-19.

Original article

Rezhime-1 Ohmmeter for Investigating Thermophysical Properties of Substances and Materials at Rest and in Flux

D. S. Simankov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia
pegasds1@mail.ru

Abstract. A high-precision ohmmeter that delivers rectangular pulses to the connected thermal sensors of various designs was developed. During the heating pulse, the electrical resistance of the sensor(s) is measured at a given frequency. The thermophysical properties of the objects under study are calculated according to conven-

tional models. The device is capable of implementing both absolute and relative measurements, which are carried out in one pulse. The uncertainty of the measured current-voltage characteristics of the measurement channel was estimated. Experiments were conducted on human skin using small-size Pt100 platinum resistance thermometers on a substrate. The use of modern sensors on a coated substrate extends the application range of the developed device in terms of non-destructive analysis of such thermophysical properties, as thermal conductivity, thermal activity, thermal diffusivity, boiling and melting temperatures of conductive and magnetically conductive measurement objects. The compact size of the sensor permits investigations on small volumes. The range of measured temperatures and pressures is determined by the sensor. The device compactness enables its use for both industrial purposes in laminar flow environments and educational purposes. The device can be used to study the thermophysical properties of plastic amorphous and bulk materials, biological and plant objects, liquids and gases and their mixtures, solids, inhomogeneous bodies in structure with and without a melting component. The irregular thermal regime allows fast and/or irreversible processes with a thermal field to be studied.

Keywords: ohmmeter, thermophysical properties, liquid, gas, solid state, amorphous bodies, MBO, plant objects, thermal sensor, chemical processes, irregular thermal regime

For citation: Rezhime-1 Ohmmeter for Investigating Thermophysical Properties of Substances and Materials at Rest and in Flux // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 6. P. 5–19. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-5-19.

Введение. Для изучения теплофизических свойств (ТФС) объектов измерения применяют разное оборудование в зависимости от условий и требований эксперимента: диапазона температур и давления, набора изучаемых физических характеристик, регулярных и иррегулярных тепловых режимов, с использованием датчиков (без него), крупногабаритного и портативного оборудования, новых экспериментальных методов измерения и регламентированных ГОСТом методов, контактных и бесконтактных методов измерений (*in vivo* и *in vitro*).

Для исследования ТФС веществ и материалов часто применяют стационарный тепловой поток. Иррегулярный тепловой режим для изучения ТФС разных объектов измерения применяется не так часто, как постоянный тепловой поток. Измерения в иррегулярном тепловом режиме проводятся гораздо быстрее и в одном опыте можно получить больше теплофизических характеристик (ТФХ), чем при постоянном тепловом потоке. В нестационарном методе измерений используют датчики с разной симметрией температурного поля, стандартные по ГОСТ 6651–2009 («Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний») и специально изготовленные. Чаще всего используют платиновые термометры сопротивления (П и Pt) типа «thin-film». Датчики по ГОСТ 6651–2009 часто используют при постоянном напряжении на них так, чтобы максимальный электрический ток не превышал заявленного значения по паспорту изделия, т. е. датчики создают постоянный тепловой

поток от себя, и с высокой точностью по ним определяют температуру в месте измерений. Специально изготовленные датчики чаще всего используются в научной работе для изучения ТФС разных объектов измерения. Разогрев датчика в иррегулярном тепловом режиме может осуществляться по-разному – синусоидально, единичным прямоугольным импульсом и серией прямоугольных импульсов.

В регулярном режиме третьего рода измерительный датчик разной симметрии температурного поля разогревают током синусоидального характера и, начиная с работы Л. П. Филиппова 1984 г. «Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева» [1], метод «горячей нити» получил дальнейшее развитие. Этот метод использовался для измерения комплекса ТФС газов и жидкостей в широком диапазоне состояний. А. А. Липаев исследовал особенности тепловых свойств широкого класса материалов и веществ [2]. Совместные работы С. Н. Кравчуна и А. А. Липаева [3] дали начало новым исследованиям температурных волн и применяются в современной теплофизике при изучении свойств веществ и материалов.

Для теплофизических измерений импульсным источником тепла существует два различных метода. При первом методе образец адиабатизирован от окружающей среды и в нем не создается направленных тепловых потоков от теплового источника, распределенного равномерно по всему объему образца. При втором методе импульсный тепловой источник действует на локальный участок образца и оставляет направленный тепловой

поток, т. е. температурное возмущение (волну). Импульсные методы из второго имеют более широкое техническое применение и позволяют определять независимо две-три теплофизические характеристики (теплопроводность, температуропроводность, тепловая активность).

В одноимпульсной модели из-за наложения температурных волн, энергия от которых не успела рассеяться по изучаемому объекту измерений, возникают малые значения (порядка единиц градусов) избыточной температуры в точке контроля. Для увеличения точности измерения температуры применяют серию импульсов теплового воздействия. Данное направление представлено основными работами – монографией Н. П. Жукова и Н. Ф. Майниковой [4] и диссертационной работой А. А. Старостина [5]. Все эти методы базируются на уравнении теплопроводности с граничными условиями второго рода, из которого в зависимости от количества поданных импульсов, выбранной схемы контроля температурно-временной зависимости, по принципу суперпозиций получают расчетные формулы для определения ТФС. Эти методы не применяются для изучения медико-биологических объектов (МБО) из-за того, что измерительный датчик может разогреться выше $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и вызвать термический ожог и болевые ощущения. Кроме этого, для данного метода измерений расчетные формулы не учитывают покрытие и подложку современных стандартных датчиков в виде термометров сопротивления, а использование экспериментальных датчиков вызывает затруднения при их изготовлении и калибровке.

Проблему избыточной температуры в одноимпульсной модели для метода «горячей нити» («hotwire») решили методически и применили для изучения разных материалов и веществ, в том числе для движущейся жидкой среды, в докторских диссертациях Г. Г. Спирин [6] в 1986 г. и Ф. Р. Габитов [7] в 2000 г. Методическое решение заключалось в увеличении времени между импульсами настолько, чтобы тепловая волна в изучаемом объекте рассеялась, а тепловые волны при разогреве датчика не перекрывались. Обычно скважность импульсов в эксперименте выбирается равной 500–1000 времен самого разогревающего импульса и контролируется по самонагреву датчика, не допуская его перегрева в работе (как рекомендовано в паспорте изделия).

Обычно при иррегулярном тепловом режиме с заводскими датчиками используется время импульса разогрева датчика в диапазоне $0.5\ldots 3\text{ с}$, редко – до 5 с. Если скорость химической реакции невелика, то возможно изучение явлений с точки зрения теплофизики в характерных временах в реакциях, где скорость их не велика.

Когда скорость изменения ТФХ от внешних и внутренних факторов не велика и времени требуется более 3 с для изменения ТФХ, объектами изучения могут служить биологические тела и растения. В таких сложных объектах измерения можно установить датчик малого размера на поверхности объекта и изучать его реакции на внешние и внутренние факторы, которые воздействуют на него дольше 5 с.

В одноимпульсной модели для метода «горячей нити» («hotwire») известны математические модели, которые учитывают наличие подложки и ненулевого защитного покрытия датчика [8]. Если использовать стандартные заводские датчики по ГОСТ 6651–2009 с определенной геометрией резистивного элемента не в стационарном разогреве, а в иррегулярном тепловом режиме, это существенно расширит их применение в научных, прикладных и учебных задачах.

В созданном устройстве могут использоваться стандартные заводские датчики по ГОСТ 6651–2009, обычно – на 100 Ом, но с геометрией резистивного элемента (рис. 1). Большинство датчиков сопротивления из платины изготавливаются на керамической подложке, толщина L^* которой обычно равна 0.63, 0.38, 0.25 мм. Линейные датчики с покрытием на подложке делают в разных модификациях. С помощью фотолитографии наносят слой платины шириной $2B$ разного состава для разных классов датчиков в виде прямой линии или меандра с расстоянием между краями напыления $2l^*$. Сверху резистивный элемент покрывают защитным слоем малой толщины δ ($\delta \ll L^*$).

Можно также применять специально изготовленные датчики в виде платиновой нити по ГОСТ 18389–2014 «Проволока из платины и сплавов на ее основе. Технические условия», или специально изготовленной нити меньшего диаметра, или специальные датчики другой конструкции без подложки в виде длинной тонкой полоски ограниченной ширины, как это сделано в [7]. Однако это может сузить номенклатуру исследуемых объек-

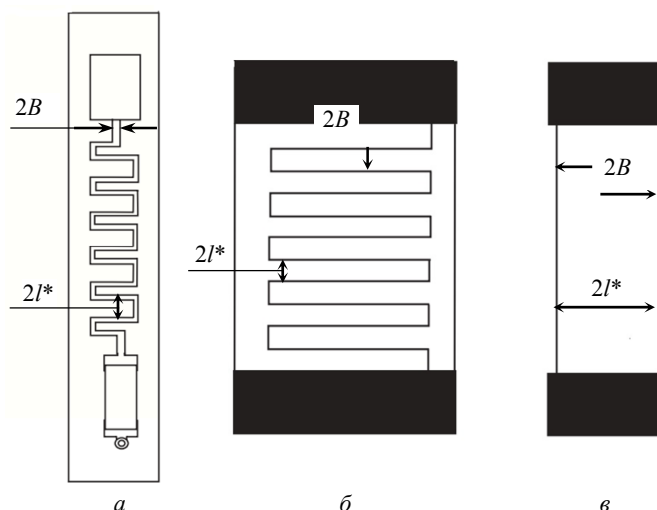


Рис. 1. Разные профили резистивного тонкопленочного элемента на стандартных заводских термометрах сопротивления, которые используются с омметром: *a* – температурные датчики серии PCB компании «YAGEO Nexensos (Heraeus)», диапазон температур $-40...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$; *б* – датчики температуры, которые монтируются на корпус платы как элементы под обозначением SMD Chip с обычным диапазоном температур $-50...+170\text{ }^{\circ}\text{C}$, но такая простая геометрия обычно встречается у нагревателей компании «YAGEO Nexensos (Heraeus)» – H 540 с диапазоном температур $-25...+850\text{ }^{\circ}\text{C}$; *в* – специально изготовленный датчик с двумя тонкими напыленными полосками

Fig. 1. Different profiles of a resistive thin-film element on standard industrial resistance thermometers that are used with the ohmmeter: *a* – «YAGEO Nexensos (Heraeus)» PCB series temperature sensors, temperature range $-40...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$; *б* – temperature sensors that are mounted on the board case as elements under the designation SMD Chip with a typical temperature range of $-50...+170\text{ }^{\circ}\text{C}$, although such a simple geometry is typical of «YAGEO Nexensos (Heraeus)» heaters – H 540 with a temperature range of $-25...+850\text{ }^{\circ}\text{C}$; *в* – a specially manufactured sensor with two thin sprayed strips

тов. Кроме того, для специально изготовленных датчиков надо будет выполнить поверку по ГОСТ 6651–2009 и уточнить другие их характеристики, особенно время термического отклика датчика.

Для простоты применения в коммерческом секторе (нефтяная, строительная, текстильная промышленности: мониторинг выходной продукции и заготовок в технологическом процессе, испытания готовой продукции, НИОКР), а также для целей лабораторного практикума в учебных заведениях (демонстрационный кабинет, компьютерный и/или для экспериментов кабинет), для специфической деятельности (криминалистика, мониторинг окружающей среды, медико-биологические исследования, опыты с растениями), в том числе научной (испытательные лаборатории, кафедральные лаборатории, экспериментальный отдел), существует не так много портативных приборов.

Потенциальное значение внедрения данного устройства еще только предстоит узнать. Проведенные эксперименты в период аспирантуры автора показали, что результаты измерения ТФС МБО сопоставимы с литературными данными в пределах неопределенности метода измерений и неопределенности, обусловленной особенностями объекта изучения. Для того чтобы экспериментальное устройство было внесено в реестр прецизионных приборов РФ, необходимо обратиться на аккредитацию в Росстандарт, ФГУП «ВНИИМС» и ФГАНУ «ЦИТиС». В настоящее время существует один патент на изобретение [9], одна программа для ЭВМ (драйвер управления) [10], подана заявка на второй патент (RU 2023105720 А), пишется программа для расширенного применения устройства (больше режимов можно задавать) и вносятся конструктивные правки в элементную базу (на плату) омметра.

Благодаря данному устройству – омметру – и стандартным датчикам становится проще проводить эксперименты в широком диапазоне не только температур, но и давлений. Омметр позволяет ускорить время проведения эксперимента благодаря многоканальности измерений (можно подключить 5 разных датчиков и для каждого задать режимы измерений). Есть ряд математических моделей иррегулярного теплового режима разогрева для разных по конструкции датчиков термометров сопротивления, и режимы эксперимента можно задавать на омметре очень разные – на этом может основываться изучение практической теплофизики.

Для оценки теплового потока с помощью автоматического регулирования параметров входящих сигналов на стандартные плоские датчики теоретически можно использовать созданный омметр в разных режимах: термоанемометра (при постоянном электрическом токе, сопротивлении и температуре), термокалориметра или их смешанной схемы (режим термоанемометра для турбулентного течения, режим термокалориметра для ламинарного течения).

Постановка задачи. Постановка задачи по созданию портативного измерительного устройства включала в себя основные требования: возможность питания устройства через автономный источник; портативность устройства с источником питания по габаритам и массе для полевых исследований, в том числе в особых условиях (холодных арктических, невесомости космоса, надежными для военного применения); регулировать напряжение на датчике для разной мощности теплового потока; формировать разные по длительности импульсы тока (напряжения); задавать время эксперимента; регулировать скважность между импульсами тока; задавать разную частоту снятия сигнала с датчика во время его разогрева в рамках одного эксперимента, а также настраивать отдельно каждый канал датчиков для эксперимента – опорное напряжение на датчике должно быть минимальным и практически не греть его, для фронта нарастания напряжения и его спада после импульса обеспечить минимальное время фронта, а его нарастание и спад сделать максимально крутым, что бы прямоугольный импульс был П-образным. Из пожеланий – компонентная база из отечественных микроэлектронных компонентов. При необходимости корпус устройства всегда можно выполнить под спецзаказ для влажного климата или для песчаных условий при экс-

плуатации. Можно также выполнить надежное крепление микроземелентов на плате, чтобы обеспечить требования к высокой виброустойчивости и к способности переносить нагрузки при больших ускорениях.

В постановку задачи также входила оценка патентоспособности создаваемого устройства и предложить новое устройство, которое отличается от ранее известных. Для этого необходимо было изучить теплофизические методы исследования свойств разных объектов измерения.

Основная часть. Использование одноимпульсного режима разогрева датчика на созданном омметре обусловлено простыми математическими моделями, которые достаточно легко автоматизировать и интерпретировать их результаты в современных программных средах не только чисто математических, как MatLab (с интерактивной средой – Simulink), но и в экспериментальных средах, когда экспериментальные данные (электрическое сопротивление) сразу подгружаются в расчетную среду через файл либо напрямую благодаря собственному программному обеспечению, что делает процесс изучения ТФС практически онлайн с визуализацией результатов и промежуточных вычислений. В подобных средах можно автоматизировать процесс вычисления, исключая грубые ошибки и проводя серии испытаний, а также использовать численные методы подбора среднего значения изучаемой величины (которая может быть получена разными способами), чтобы уменьшить ее неопределенность в значении. В самом простом случае изучаемые величины связаны общей формулой $\lambda = \varepsilon a^{1/2}$. Расчетные формулы связи температуры с ТФС разные и часто громоздкие для абсолютного метода измерений, а для относительного метода измерений – гораздо проще. Поэтому раньше часто использовали относительный метод измерений. После того как было доказано (А.с. СССР № 463931, Измеритель сопротивления резистивного датчика / В. С. Гутников, В. В. Лопатин, МПК G01rN27/16, опублик. 02.09.1975, БИ № 10), что лучший способ определения сопротивления датчика – это его четырехканальное подключение, начали модифицировать электрическую схему мостика Уинстона и воплощать ее на более компактном современном оборудовании.

Существуют абсолютный и относительный методы проведения эксперимента. Созданный

омметр по сути реализует абсолютный метод измерений. При таком методе измерений необходимо знать параметры используемого датчика. Кроме геометрических размеров подложки, покрытия и резистивного элемента требуется также знать ТФХ подложки датчика. В аспекте математической задачи при абсолютном методе измерений надо знать (рассчитать) тепловой поток от датчика, а при относительном этого не надо. Но при относительном методе измерений надо иметь эталонное вещество, близкое по ТФХ к изучаемому объекту. Подробнее о методе «горячей нити» дано в [6], [7]. Относительный метод измерений на созданном устройстве можно реализовать, если модифицировать расчетные формулы и одновременно измерять эталонное вещество или материал с исследуемым. Модификация относительного метода измерений простая: если в обычном относительном методе используется электрическая схема – мостик Уинстона – и через дифференциальный усилитель определяют в конце импульса сопротивление измерительного датчика, то в модификации это сопротивление измерительного датчика уже измерено на омметре и требуется одно из переменных сопротивлений рассчитать.

Аппаратура и используемые датчики. Весь комплекс для проведения эксперимента включает в себя: омметр, датчики, соединительные провода для подключения датчиков, портативный источник питания постоянного напряжения или сеть переменного напряжения, выпрямитель напряжения с регулированием подаваемого напряжения на устройство, кабель соединения с персональным компьютером (ноутбуком) и принтер (опционально для визуализации графиков изменения ТФС исследуемых объектов измерения). Функциональная схема комплекса представлена на рис. 2.

Модель бесконечной полоски ограниченной ширины на подложке, или модель плоскости, реализуется на датчиках RTD с напылением резистивного элемента (РЭ) методом фотолитографии. Так, на датчике Heraeus PCB 2225 реализуется модель полоски ограниченной ширины, поскольку РЭ выполнен в виде меандра широкого. Для реализации модели нагреваемой плоскости необходимо, чтобы РЭ был расположен на подложке в виде спирали Архимеда с постоянным шагом, либо в виде меандра. Для того чтобы тепловая волна от датчика с геометрией РЭ в виде меандра была плоской, необходимо небольшое расстояние между полосками РЭ – l . Температура между полосками должна составлять не менее

90 % от температуры самой полоски РЭ. Зная температуропроводность a подложки датчика, можно узнать минимальное время разогрева датчика $t_{\min}$ по формуле ниже, которое должно быть больше времени термического отклика датчика, которое указано в его паспорте, чтобы корректно идентифицировать сигнал и в дальнейшем перевести его из электрического сопротивления в температуру, а далее – в ТФХ:

$$\sqrt{\pi} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{l/2}{2\sqrt{at_{\min}}} \geq \frac{9}{10}.$$

Например, для датчика Heraeus C 416 можно применять очень короткие импульсы его разогрева. Но для экспериментов, где необходимы длительные (около 5 с) и мощные импульсы – например, при изучении сыпучих материалов или материалов с компонентом, уже потребуется датчик в виде тонкопленочного нагревателя Heraeus H 540 S. Обычно такие нагреватели имеют сопротивление в 10...30 Ом, и разработанный омметр при их прямом подключении не сможет проводить измерения. Для этого последовательно к датчику подключается резистор номиналом от 50 Ом, имеющий стабильное электрическое сопротивление. Требуется также измерить контактное сопротивление после пайки для корректных расчетов. При экстремальных условиях проведения эксперимента необходимо учитывать не только контактное сопротивление, но и термоэлектрические эффекты.

В некоторых моделях можно не учитывать толщину подложки датчика $L_{\text{подл}}$, для чего минимальное время разогрева датчика $t_{\text{подл}}$ можно по следующей формуле, зная температуропроводность подложки a :

$$L_{\text{подл}} = \frac{\int_0^{\infty} T(x, t_{\text{подл}}) dx}{T(x=0, t_{\text{подл}})} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{at_{\text{подл}}}.$$

В местах пайки и на самом резистивном элементе возникают термоэлектрические явления – это явления прямого преобразования теплоты в электричество в твердых проводниках, а также обратные явления прямого нагревания и охлаждения спаев двух проводников проходящим током. К термоэлектрическим явлениям относятся термоэлектрический эффект Зеебека, электротермические эффекты Пельтье и Томсона. Эти эффекты имеют свои коэффициенты. Все три тер-

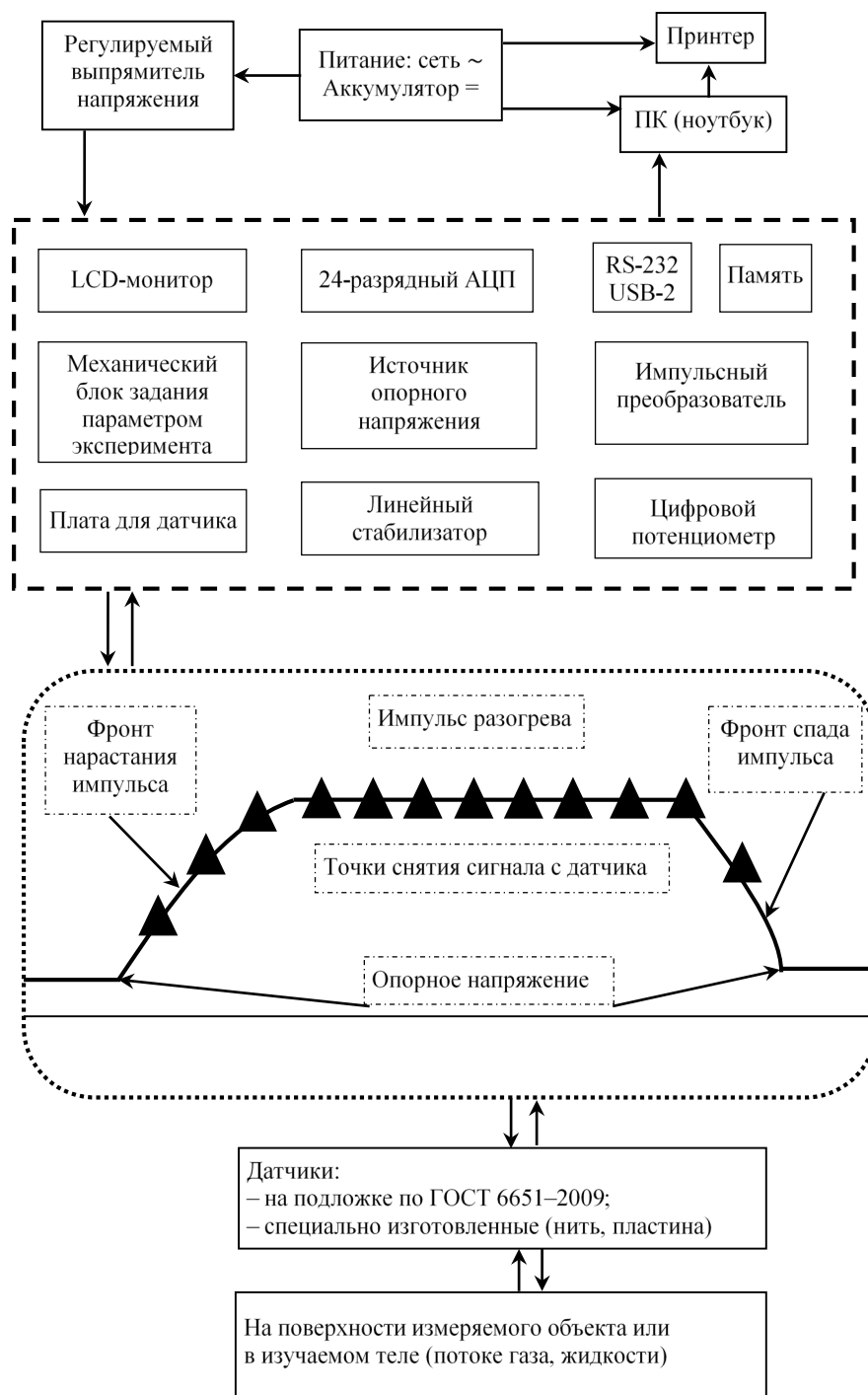


Рис. 2. Функциональная схема проведения эксперимента
 Fig. 2. Functional diagram of the experiment

моэлектрических коэффициента, зависящие от параметров спаев и от свойств самих материалов – дифференциальный коэффициент термо-ЭДС a_T , коэффициент Пельтье Π и коэффициент Томсона t связаны между собой соотношением Кельвина $a_T = \Pi/t$, поэтому все эти три термоэлектрических эффекта взаимосвязаны с их коэффициентами. Причина всех термоэлектрических явлений заключается в нарушении тепलो-

го равновесия в потоке носителей заряда, т. е. в отличии средней энергии электронов в потоке от энергии Ферми.

В промышленности могут возникнуть случаи, когда поток жидкости течет не в металлической трубке, а в магнитопроницаемом материале (например, специальном пластике). Для металлических конструкций внешние электромагнитные поля не влияют на свойства жидкости в трубе,

поскольку она находится в конструкции клетки Фарадея. Если жидкость протекает во внешнем магнитном поле, то для измерительного датчика, расположенного в ней, возникнут термомагнитные эффекты: эффект Эттингсгаузена и поперечный эффект Нернста–Эттингсгаузена. Такое магнитное поле также может влиять на гидродинамические характеристики протекающей проводящей и/или магнитной жидкости по трубе. В каждом конкретном случае делаются соответствующие оценки вклада каждого эффекта в регистрируемое электрическое сопротивление на разработанном устройстве, а также оценивается сама жидкость на соответствие математической модели, предложенной в [7], с учетом того, что используемый датчик может применяться в токопроводящей жидкости, поскольку он располагается на подложке с покрытием и его места крепления электро- и тепло-изолированы, как и сами токопроводящие провода от устройства.

Большинство описанных эффектов и дополнительных электрических сопротивлений очень мало при измерениях в диапазоне $-50 \dots +150^\circ\text{C}$ и в пределах погрешности (неточности) измерений может быть игнорировано. Но при криогенных измерениях, а также при измерениях до 850°C эти эффекты надо учитывать и оценивать. Следует учитывать и скорость разогрева датчика, и его температурный перегрев за это время. Не рекомендуется допускать импульсы тока выше максимального по паспорту изделия, а время импульса – более 5 с. При таком эксперименте датчик разогреется не более, чем на $3 \dots 5^\circ\text{C}$, что для модельной задачи с формулой Фурье приемлемо, поскольку температурная волна в изучаемом объекте распространяется линейно. При более длительных и мощных импульсах закон Фурье уже не работает и надо вводить запаздывание как по времени, так и по тепловому потоку одновременно, что вводит дополнительную производную второго порядка для температуры по времени. Это другой класс задач, который можно реализовать на данном устройстве, но пока математический аппарат описания и проведение эксперимента требуют более детального изучения и не входят в уже описанные рассматриваемые случаи.

Решение задачи. Техническое воплощение способа сводится к реализации электрической схемы, описанной в [9]. Принцип действия устройства (омметра), состоящего из соединителей, фильтров низких частот, 24-разрядного АЦП, прецизионного источника опорного напря-

жения, микроконтроллеров, прецизионного регулируемого линейного стабилизатора, цифрового потенциометра, импульсного преобразователя, набора резисторов и транзисторов, конденсаторов, сконфигурированных на плате так, что можно подключать пять датчиков. Условия эксперимента задаются механическими кнопками на плате, а значения показываются на LCD-дисплее. После настройки необходимых каналов измерения (всего их пять штук) и подключения к персональному компьютеру для вывода результатов эксперимента из памяти устройства, нажимается кнопка «Пуск» и проводится эксперимент. В процессе проведения эксперимента данные накапливаются в устройстве памяти на плате, а по окончании процесса передаются на персональный компьютер по средствам интерфейса RS-232 и конечным результатом служит текстовый файл для дальнейших расчетов.

В выданном патенте на изобретение [9] дан анализ известных научных устройств и приборов, наиболее близких к предлагаемому омметру.

Суть изобретения заключается в регистрации сопротивления резистивного датчика во время его разогрева импульсом тока с заданной частотой снятия сигнала, при этом длительность фронта импульса и длительность спада импульса напряжения (тока) на датчике имеют минимальное время и практически прямую форму, а также существует возможность задавать разное время импульса тока и его мощность с помощью изменения подаваемого напряжения. Вследствие многоканальности устройства (омметра), использования стандартных заводских датчиков на подложке или специально изготовленных и поправок в расчетные формулы сокращается время измерения значений теплофизических величин – теплопроводности и тепловой активности, повышается информативность измерений, воспроизводимость результатов, а благодаря возможности передачи измерений на компьютер становится возможным изучение теплофизических свойств в режиме реального времени.

Данное устройство реализует абсолютный метод импульсного иррегулярного теплового режима со следующими характерными входными данными:

1. Выбирается режим использования канала цифрой 1 – «снятие» или 2 – «импульс».

2. Напряжение U , подаваемое на датчик, регулируется в диапазоне значений: 0.01 В, от 0.05 до 1 В с шагом 0.05 В, от 1 до 10 В с шагом 0.5 В, от 10 до 20 В с шагом 5 В.

3. Частота снятия сигнала в импульсе сопротивления датчика выбирается от 0.005 до 1 с шагом 0.005 с.

4. Время импульса задается от 0.01 с до 5 с с шагом 0.01 с.

5. Время следующего импульса задается как произведение времени импульса на заданное число из диапазона от 2 до 700 с шагом 1.

6. Режим опроса датчика всегда формируется при напряжении 0.01 В; задаются частота опроса датчика, как в п. 2, и время, в течение которого будет проводиться эксперимент, – от 30 с до 5 мин с шагом в 30 с.

7. Время проведения эксперимента ограничено 15 мин, поскольку больше не позволяет память устройства.

8. Минимальное сопротивление датчика, который можно подключить к устройству, – 35 Ом (но рекомендуется от 50 Ом).

Может существовать и другая модификация прибора с более расширенными возможностями проведения эксперимента для модифицированного относительного метода измерений. Заявка на патент подана автором статьи (RU 2023105720 А).

На рис. 3 изображен сам омметр с подключенным одним каналом измерения и датчиком – термометром сопротивления платиновым.

К отличительным особенностям омметра относятся следующие:

1. Можно проводить измерения по пяти каналам измерений одновременно.

2. Каждый канал измерения можно настроить отдельно.

3. Можно использовать стандартные заводские и специально изготовленные датчики разной геометрии теплового поля – линейные и плоскостные.

4. Фронт нарастания и спада тока в импульсе происходит практически сразу, делая импульс П-образным.

5. Во время импульса тока с заданной частотой снимаются показания сопротивления датчика в каждом импульсе на каждом канале измерения и фиксируются в оперативной памяти устройства (омметра), после чего передаются на персональный компьютер.

6. Компонентная база элементов устройства не имеет дрейфа.

7. Четырехканальная схема подключения обеспечивает высокую точность и воспроизводимость результатов измерения электрического сопротивления.

8. Датчик разогревается одним П-образным импульсом, после чего следует энергии возле датчика дать время на диссипацию.

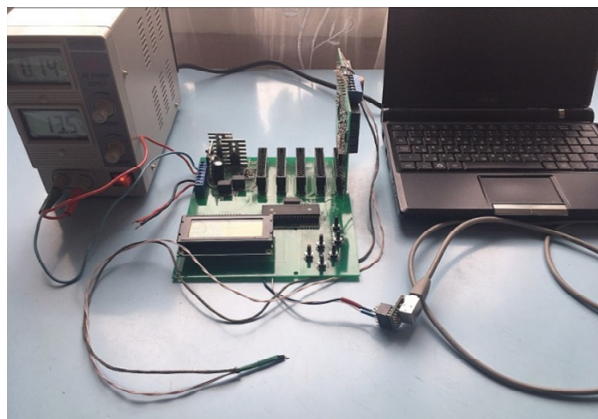


Рис. 3. Комплекс оборудования «Режим-1» для проведения эксперимента

Fig. 3. Complex of equipment «Mode-1» for the experiment

Важной особенностью данного омметра стало уменьшение времени нарастания и спада фронтов импульса, а их значения практически сразу выходили на заданный уровень сигнала и потом резко спадало, что соответствует модели единичного П-образного импульса, разогревающего датчик. При заявленной неопределенности в нахождении электрического сопротивления в 0.1 % за счет создаваемого оборудования, расчеты конкретных компонентов дали гораздо меньшую неопределенность в измеряемом параметре. На собранной компонентной базе расчет показал следующее. По каналу измерения напряжения максимальное отклонение от идеального входного сигнала – $0.12 + 0.108 \%$. Разрешающая способность АЦП «без шумов» в 26 раз лучше, чем требуемая точность измерений (0.1 %) для диапазона 1 В, и в 52 раза лучше, чем в остальных диапазонах. Максимальное отклонение измеренного сопротивления от идеального составило $0.147 + 0.117 \%$. Точность измерения по каналу напряжения может быть улучшена применением резисторов с допускаемым отклонением 0.005 % и улучшенным ТКС (отечественные резисторы – по спец. заказу) вместо заложенных в расчет резисторов с отклонением 0.01 % и/или калибровкой источника опорного напряжения совместно с проведением системной калибровки всего канала измерения напряжения. Поскольку для измерения тока в расчет приняты предельно точные резисторы, выпускаемые промышленностью, то точность измерения по каналу тока может быть улучшена только калибровкой источника опорного напряжения совместно с проведением системной калибровки всего канала измерения тока.

На таком оборудовании можно проводить ряд экспериментов абсолютным и относительным

методами измерений в иррегулярном тепловом режиме с использованием стандартных заводских и специально изготовленных датчиков. Для того чтобы не изготавливать специальные датчики, можно применить ряд физико-математических моделей для использования стандартных заводских датчиков для ряда экспериментов, в которых они ранее не использовались. Эти модели позволяют учитывать внутренние и внешние факторы, влияющие на результат измерения и расчетов ТФС объекта измерения, благодаря чему номенклатура измеряемых объектов увеличивается. Из-за малого размера датчика и защиты резистивного элемента с помощью подложки и покрытия кроме увеличения номенклатуры измеряемых объектов расширяется их спектр – за счет проведения эксперимента в малых объемах и дополнительно становится возможным проведение эксперимента с растениями и медико-биологическим объектом (МБО) в динамике и покое. Стоит также отметить, что эти датчики и омметр могут применяться для изучения ТФС жидкости и газа в ламинарном потоке благодаря разработанной и проверенной модели [7].

При использовании стандартных заводских датчиков на подложке с покрытием расширяется перечень решаемых задач по изучению ТФС, которые ранее не могли быть решены. В первую очередь, это измерение ТФС тел и жидкостей – электропроводных и/или намагниченных. За счет физико-математических моделей неопределенность в измерениях ТФС значительно снизилась, особенно для изучения МБО, где внешние и внутренние факторы дают гораздо большую неопределенность в результатах исследования, чем погрешности метода измерения на рассматриваемом устройстве (омметре).

Особенности процессов исследования. Для проведения экспериментов с использованием иррегулярного теплового режима для разогрева датчика одним прямоугольным импульсом тока (напряжения) необходимо: знать объект изучения; знать характеристики используемого датчика; правильно выбрать режим разогрева датчика; после исключения грубых ошибок в экспериментальных данных рассчитать изучаемые ТФС; выполнить уточнение полученных данных по ГОСТ Р 8.736–2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений». В зависимости от объекта изучения реализация эксперимента модифицируется.

К характеристикам датчика относятся: толщина подложки, ТФС подложки (теплопроводность, тепловая активность (инерция)); для полоски и меандра надо знать общую длину резистивного элемента и его площадь; для частого меандра надо знать расстояние между его полосками и эффективную площадь^{*}; время термического отклика; класс точности датчика; максимальный ток, не вызывающий перегрева датчика; материал выводов от датчика и рекомендации по пайке их с соединительными проводами к омметру.

Для изучения газа или его смеси необходимо установить его состав, класс опасности, давление в эксперименте, температуру, при которых планируется проведение эксперимента, а также наличие примесей других газов и взвесей. Необходимо знать структуру, наличие изомеров в одной смеси и возможные структурные изменения при внешнем воздействии (температура и давление) для газа. Знания о поляризуемости и электро-/магнитопроводимости газа также необходимы – для изоляции проводов и места спаев у датчика. При экспериментах иногда надо учитывать и наличие радиационного фона и гравитации. Кроме того, надо знать, в покое будет газ или в движении.

Для изучения жидкостей важны такие же данные, как и для газа. У жидкостей есть и еще одна особенность – изучение свойств в объеме и в тонких пленках резко отличаются. Омметр не предназначен для изучения тонких пленок. Необходимо определить, что считать тонкой пленкой, а что – жидкостью в малом объеме. В органических жидкостях часто встречаются изомеры одного и того же вещества, могут происходить химические преобразования молекул одного вида в другие под действием температуры, давления и других факторов (радиация X-Ray, pH, ультрафиолет, излучение), а также при наличии катализатора, который может вступать в реакцию только при определенных условиях. При определении температуры гомогенной нуклеации (кипения) очень важно очистить жидкость перед измерениями и исключить пузырьки воздуха в ее объеме. При изучении смеси жидкостей возникает ряд дополнительных характеристик, которые надо учитывать – наличие/отсутствие аддитивных свойств, скорость химической реакции, бифуркационные

^{*} Эффективная площадь – это площадь, ограниченная на подложке резистивным элементом, увеличенная в каждую сторону на половину расстояния между дорожками резистивного элемента.

явления и др. – чтобы верно рассчитывать ТФС для всего этого, нужен математический аппарат. Методами молекулярной динамики можно достаточно хорошо описать изучаемую среду.

Изучение твердых тел сопряжено с трудностями подготовки измеряемого образца, а именно – необходимо выбирать размер испытуемого тела не меньше размеров самого датчика, а также необходимо обеспечить контакт между датчиком и исследуемым телом без прослойки воздуха, что возможно при сопоставимых классах шероховатости поверхностей. При необходимости твердое тело в месте контакта с датчиком специально зачищают, но и этого бывает недостаточно. Для исключения воздушной прослойки место контакта на твердом теле обрабатывают тонким слоем термопасты, вазелина, иного вещества с ТФС, схожими с твердым телом (в том числе специально подготовленной смесью, которая содержит измельченный образец и основу). Если изучаемое твердое тело неоднородно по своей структуре, то необходимо, чтобы длина теплового поля от датчика была больше размеров неоднородностей, а потому надо установить размеры неоднородностей в твердом теле, а также температуру, при которой плавится компонент материала, для корректного проведения эксперимента для твердого тела. Для анизотропного твердого тела в виде слоистого тела желательно знать толщины слоев. Надо учесть при измерениях такие свойства, как хрупкость материала при прикладывании к нему датчика, чтобы не нарушить его структуру в месте измерения.

При изучении аморфных (пластичных) тел необходимо знать такие же данные, как и для твердых тел, и при эксперименте обеспечить плотный контакт датчика и аморфного тела. Однако существуют такие материалы, которые при определенных условиях становятся хрупкими или сильно тягучими. Кроме этого, при некоторых исследованиях аморфных тел желательно пользоваться термомеханическими математическими моделями, в том числе с запаздыванием теплового фронта по тепловому потоку и времени, поскольку современные аморфные пластичные материалы часто обладают уникальными свойствами при определенных внешних условиях. При прикладывании датчика к аморфным телам надо создавать минимальные деформации в них. Это и есть основная трудность для изучения их ТФС в эксперименте.

Особым объектом для изучения служит медико-биологический объект, а именно – кожа человека или поверхность внутреннего органа. Здесь можно выделить три типа экспериментов. К первому типу относится изучение анатомических частей человека или другого биологического объекта, в том числе эксперименты на неживом объекте, а также изучение компонентов состава изучаемого объекта, например для кожи и внутренних органов – разделенные и высушенные фракции белков, жиров, углеводов и воды. Обычно углеводы не учитываются ввиду их малого содержания в организме (2–3 % от массы). Далее по общей теории теплопроводности рассчитываются ТФС с учетом того, что компоненты обладают свойством аддитивности. Для биологических жидкостей эксперимент может быть проведен только в покое как для других жидкостей. При этом надо учитывать, что эти жидкости при определенных условиях разрушаются, а потому надо учитывать скорость необратимых процессов (в первую очередь под действием температуры окружающей среды). При разогреве самого датчика может меняться состав изучаемой биологической жидкости в объеме ее теплового зондирования. Ко второму типу экспериментов относятся опыты над живыми неподвижными МБО. В этом случае тепловой поток от тела минимален, а крепление датчиков к участку тела относительно простое. При прикладывании датчика к телу МБО волосяной покров убирают, кожа должна быть чистой. Сила прижатия датчика не должна перекрывать кровоток, а само место не должно быть расположено рядом с кровеносным сосудом. Особенностью живых МБО является то, что в клетках происходит метаболизм – это внутренний источник тепла в объеме, а также существует капиллярное кровеносное русло с более крупными сосудами, которые также необходимо учитывать как источник постоянного тепла с цилиндрической поверхности, причем распределение теплового потока должно учитывать, что артериальный сосуд отдает тепло в биоткань и в венозный сосуд, а венозный сосуд – только в биоткань. Кроме этого, благодаря пульсу тепловой поток биотепла внутри МБО носит переменный характер. Постоянное тепловое воздействие от датчика накладывается на ритмичное колебание биотепла. К третьему типу экспериментов относится изучение МБО в динамике. Достаточно сложно подобрать участки кожи человека, где можно надежно установить датчик для изучения ТФС анатомического места

измерения. Стоит отметить, что на измерения ТФС живого МБО влияет очень много внешних и внутренних факторов, поэтому планировать эксперимент следует с максимальным описанием всех факторов и их количественной оценкой. Из этого следует, что для различных биологических задач существует огромное поле для исследования, вносящее конкретику в общие статистические модели. Самый общий обзор дан в открытых публикациях [11], [12].

Кроме того, изучение ТФС растений возможно по примеру пластичных аморфных тел. При этом эксперимент, как с МБО, может быть проведен на живом или срезанном растении. На срезанном растении можно провести замеры или разделить на составляющие объект измерения и измерить их отдельно, а далее по общей теории теплопроводности рассчитать ТФС с учетом того, что компоненты в основном обладают свойством аддитивности. В отличие от МБО, в растениях углеводы могут содержаться в гораздо большем количестве – до 80 % от массы.

Результаты и обсуждение. В качестве медико-биологического объекта был взят среднестатистический человек, т. е. один здоровый человек мужского пола, возрастом 35 лет. Эксперименты выполнены при температурах эпидермиса в диапазонах 0...3, 10...13, 24...26 и 40...42 °С. Полученные результаты сопоставимы в пределах неопределенности измерения (оборудование + метод + матмодель) с ранее опубликованными в [13]–[15], которые были выполнены относительным методом измерения на другом оборудовании, в основе которого лежит электрическая схема мостика Уинстона. Эксперименты на омметре выполнены относительным и абсолютным методами измерения. Более подробно о том, как планировать эксперимент и учитывать разные факторы, написано в приведенной ранее литературе.

Любые измерения на созданном омметре и дальнейшие расчеты дают ТФХ, искаженные радиационным теплопереносом, и потому эффективны. Для того чтобы изучать молекулярные ТФХ (так называемые истинные), можно во многих случаях, описанных в литературе, отдельно рассчитать примерную составляющую часть теплового потока от изучаемого объекта, которая вносит свой вклад в температуру резистивного элемента датчика, которую получают в опыте (переводом сопротивления в температуру). Для каждого конкретного объекта измерения расчет производится отдельно согласно его структуре и известным математическим моделям.

Поскольку на измерения ТФС живого МБО влияют многие внешние и внутренние факторы, планирование эксперимента должно иметь максимально подробное их описание и количественную оценку. Следовательно, для биологических задач разного применения имеется огромное поле исследований, вносящее конкретику в общие статистические модели. Наиболее общий их обзор дан в [11], [12].

Для МБО применять стандарты обработки экспериментальных данных, которые используются в технических задачах, неправильно. При обработке экспериментальных данных МБО необходимо выявлять только грубые ошибки измерений, и необходимо максимально подробно описывать состояние объекта измерения именно физиологическими и биологическими терминами [15].

Значения коэффициентов теплопроводности и тепловой активности для любого анатомического места возрастают по гиперболе, которая аппроксимируется кубической регрессией с коэффициентом корреляции и детерминации равными единице. Это означает, что коэффициенты эффективной теплопроводности и тепловой активности кожи человека в диапазоне 0...42 °С можно представить степенным рядом третьей степени зависимости от температуры. Ранее считалось, что эта зависимость линейная или квадратичная.

Тепловая активность керамической подложки при 0 °С $\varepsilon = 8396 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}^{0.5})$ и теплопроводность при 0 °С $\lambda = 25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ установлена в опыте для используемых датчиков. При небольшом диапазоне температур эти значения можно считать постоянными.

Использование специально изготовленных датчиков в виде тонкой платиновой нити диаметром 2.5...5 мкм, а также платиновой пластины ограниченной ширины без подложки несет в себе не только ограничения по использованию (нельзя измерить параметры токопроводящих объектов исследования), но и метрологические погрешности в виде непостоянного диаметра самой нити, сопряженные с дополнительными усилиями по калибровке и поверке датчика, которые часто не отражают всех его характеристик. Важной характеристикой становится *время термического отклика датчика* (или тепловая инерция датчика), обусловленное его тепловой активностью (инерцией). Это более корректная величина, чем теплоемкость, для характеристики времени разогрева датчика, показывающая, через какое время тем-

пература датчика изменится на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Специально изготовленные на другом экспериментальном оборудовании датчики на кафедрах при разных вузах разогревали серией прямоугольных импульсов или синусоидальным периодическим напряжением (током). Время термического отклика не учитывалось. Более того, не устанавливались такие параметры, как стабильность работы термометра сопротивления; максимальный ток для датчика; частое использование 2- и 3-канальных схем подключения; контактные явления между датчиком и объектом измерения, контактные явления в местах пайки проводов датчика; термо-ЭДС; гистерезис; изоляция проводов; рекомендованная пайка проводов. На эти данные отчасти можно не обращать внимания, но их совокупность уже нельзя игнорировать для корректного проведения эксперимента и верного расчета. Большинство таких факторов дают погрешность определения менее $0.01\ldots 0.1\%$ по отдельности, но в совокупности этот суммарный показатель неопределенности увеличивается. Также специально изготовленные датчики стоят дороже и времени на их поиск и изготовление уходит больше, чем для стандартных заводских промышленных датчиков. Более того, промышленные датчики некоторые производители могут изготавливать специальными партиями, согласовав с заказчиком увеличение класса точности, габариты подложки, номинальное сопротивление и т. п. Технологии изготовления тонкопленочных датчиков уже предлагают изделия на 1000 Ом , что убирает один из важных источников неопределенности – соединительные провода от датчика к устройству с их электрическим сопротивлением. Совершенствование метода нанесения резистивного элемента (обычно платина) – фотолитографии, позволяет делать эти дорожки более плоскими, т. е. их класс шероховатости изменяется и выравнивается средняя толщина самой дорожки, становясь более тонкой. Для математической модели такой слой элемента принимается нулевым, что соответствует практическому физическому состоянию.

Именно поэтому датчики по ГОСТ 6651–2009, изготовленные промышленно, предпочтительнее, чем специально изготовленные. Многие параметры регулируются этим документом и имеют определения в нем. Термоэлектродвижущая сила (ТЭДС) на выводах стандартных заводских датчиков при максимальной температуре диапазона

измерений и максимальном измерительном токе не должна приводить к выходу датчика из класса допуска при двух направлениях тока в измерительной цепи. Гистерезис: значения сопротивления стандартного заводского датчика, измеренные в одной и той же температурной точке, соответствующей $1/2$ рабочего диапазона в условиях нагрева и охлаждения датчика от верхнего до нижнего предела рабочего диапазона, должны оставаться в пределах допуска соответствующего класса. Неопределенность поверки термометров сопротивления по ГОСТ 6651–2009 можно считать, используя различные программные средства, например программу расчета TCal-8-461, сертифицированную во ВНИИМ.

Заключение. Устройство (омметр), изготовленное как «home-made», предназначено, главным образом, для быстрого и точного определения и контроля значений тепловой активности, теплопроводности и температуропроводности для научных целей и для промышленного применения. В сравнении с аналогами заявленный способ измерения и устройство (омметр), запатентованные как изобретение, обеспечивают большую информативность из-за регистрации сопротивления датчика во время его разогревания прямоугольным импульсом тока; из-за учета линейных размеров датчика и резистивного элемента на нем, а также наличия подложки и покрытия у измерительного датчика. Устройство может применяться для измерения свойств жидкости (газа) в потоке: тепловой активности, теплопроводности, температуропроводности и кинематической вязкости среды. Возможно применение устройства для определения температуры кипения жидкостей, а также теплофизических свойств МБО и растений. Подробно дан анализ того, какие датчики по конструкции следует использовать при измерениях на данном устройстве, а также даны критерии выбора длительности времени прямоугольного единичного разогревающего датчик импульса тока (напряжения). Эти критерии позволяют использовать промышленный датчик не только в инженерных целях, но и в научных. Описанное устройство и методики проведения на нем экспериментов можно также использовать для лабораторных практикумов в учебных заведениях, а при доработке корпуса – при пониженной температуре (в арктических условиях) для экспресс-анализа проб в научных экспедициях. Омметр с датчиками можно применять для оценки

теплового потока в разных режимах: термоанометра и термокалориметра или их смешанной схемы (режим термоанометра для турбулентно-

го течения, режим термокалориметра для ламинарного течения), однако требуется создание специального ПО для контроллера.

Список литературы

1. Филиппов Л. П. Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. М.: Энергоатомиздат, 1984. 104 с.
2. Липаев А. А. Применение метода периодического нагрева в экспериментальной теплофизике // Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ» / СПбГУНиПТ. СПб., 2010. Т. Ч. 1. С. 182–195.
3. Кравчун С. Н., Липаев А. А. Метод периодического нагрева в экспериментальной теплофизике: монография. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2006. 208 с.
4. Жуков Н. П., Майникова Н. Ф. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий. М.: Машиностроение-1, 2004. 288 с.
5. Старостин А. А. Разработка средств теплофизических измерений для исследований в области высоких давлений и температур: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.01. Екатеринбург. 2010. 140 с.
6. Спирин Г. Г. Кратковременные измерения в стадии иррегулярного теплового режима и диагностика теплофизических свойств диэлектрических веществ и материалов на их основе: дис. ... д-ра техн. наук / ИВТАН. М., 1986. 390 с.
7. Габитов Ф. Р. Теплофизические свойства органических жидкостей в широком диапазоне температур, не искаженные радиационным теплопереносом: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.05. Казань, 2000. 535 с.
8. Симанков Д. С. Влияние покрытия на формирование полей температур при кратковременном контакте двух полугораниченных неизотермических тел // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. URL: <https://www.science-education.ru/108-8621>. doi: 10.6084/m9.figshare.14527197 (дата обращения 02.02.2023).
9. Пат. 2784681 С2 (RU). Устройство для измерения теплофизических свойств пластичных материа-

лов / Д. С. Симанков. Заявл. 26.01.22; опубл. 29.11.22; бюл. № 34. 30 с.

10. Свид-во 2023611620. Программа регистрации и передачи данных об электрическом сопротивлении датчика(ов) в одном или серии импульсов тока для прецизионного омметра («Режим-1», изобретение № 2784681 регистрация 29.11.2022); программа для ЭВМ / Д. С. Симанков. Заявл. 2023610583 11.01.2023; опубл. 23.01.2023; бюл. № 2. 63339 байт.

11. Criteria for a recommended standard: Occupational exposure to heat and hot environments / B. Jacklitsch, W. J. Williams, K. Musolin, A. Coca, J.-H. Kim, N. Turner // Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH). No. 2016–106. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-106/default.html> URL: https://ru.wikibooks.org/wiki/Защита_работников_от_нагревающего_микроклимата. (In Russ.) (дата обращения 05.02.2023).

12. Heat and Cold. Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, 4th ed. (4 Vol.) / ed. by J. M. Stellman, 1998. URL: <https://www.goodreads.com/book/show/3978876-encyclopaedia-of-occupational-health-and-safety-4-volume-set> (дата обращения 12.02.2023).

13. Simankov D. S. Problem of Brief Interaction of Liquid and Amorphous Bodies // J. of Eng. Phys. and Thermophys. 2016. № 89(1). P. 186–191. doi: 10.1007/s10891-016-1366-z.

14. Симанков Д. С. Измерение тепловой активности поверхностных тканей медико-биологического объекта импульсным методом // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13816>. doi: 10.6084/m9.figshare.14527275 (дата обращения 12.02.2023).

15. Simankov D. S. The problem of brief interaction of two amorphous bodies // Thermal Sci. and Engin. Progress. 2021. Vol. 28(1). P. 101174. doi: 10.1016/j.tsep.2021.101174.

Информация об авторе

Симанков Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры физики института «Компьютерные науки и прикладная математика», Московский авиационный институт (НИУ). МАИ, Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Россия.
E-mail: pegasds1@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7970-5422>

References

1. Filippov L. P. Izmerenija teplofizicheskikh svojstv veshhestv metodom periodicheskogo nagreva. M.: Jenergoatomizdat, 1984. 104 s. (In Russ.).

2. Lipaev A. A. Primenenie metoda periodicheskogo nagreva v jeksperimental'noj teplofizike // Sb. tr. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Sovremennye metody i sredstva

issledovaniy teplofizicheskikh svoystv veshhestv» / SPbGUNIPT. SPb., 2010. T. Chast' 1. S. 182–195. (In Russ.).

3. Kravchun S. N., Lipaev A. A. Metod periodicheskogo nagreva v jeksperimental'noj teplofizike: monografija. Kazan': Izd-vo Kazanskogo un-ta, 2006. 208 s. (In Russ.).

4. Zhukov N. P., Majnikova N. F. Mnogomodel'nye metody i sredstva nerazrushajushhego kontrolja teplofizicheskikh svoystv materialov i izdelij. M.: Mashinostroenie-1, 2004. 288 s. (In Russ.).

5. Starostin A. A. Razrabotka sredstv teplofizicheskikh izmerenij dlja issledovaniy v oblasti vysokih davlenij i temperature: dis. ... kand. tehn. nauk: 01.04.01. Ekaterinburg. 2010. 140 s. (In Russ.).

6. Spirin G. G. Kratkovremennye izmerenija v stadii irreguljarnogo teplovogo rezhima i diagnostika teplofizicheskikh svoystv dijelektricheskikh veshhestv i materialov na ih osnove: dis. ... d-ra tehn. nauk / IVTAN. M., 1986. 390 s. (In Russ.).

7. Gabitov F. R. Teplofizicheskie svoystva organicheskikh zhidkostej v shirokom diapazone temperatur, ne iskazhennye radiacionnym teploperenosom: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.14.05. Kazan', 2000. 535 s. (In Russ.).

8. Simankov D. S. Vlijanie pokrytija na formirovanie polej temperatur pri kratkovremennom kontakte dvuh poluogranichennyh neizotermicheskikh tel // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2013. № 2. URL: <https://www.science-education.ru/108-8621>. doi: 10.6084/m9.figshare.14527197 (data obrashhenija 02.02.2023). (In Russ.).

9. Pat. 2784681 S2 (RU). Ustrojstvo dlja izmerenija teplofizicheskikh svoystv plastichnyh materialov / D. S. Simankov. Zajavl. 26.01.22; opubl. 29.11.22; bjul. № 34. 30 s. (In Russ.).

10. Svid-vo 2023611620. Programma registracii i peredachi dannyh ob jelektricheskom soprotivlenii datchika(ov) v odnom ili serii impul'sov toka dlja precizion-

nogo ommetra («Rezhim-1», izobretenie № 2784681 registracija 29.11.2022): programma dlja JeVM / D. S. Simankov. Zajavl. 2023610583 11.01.2023; opubl. 23.01.2023; bjul. № 2. 63339 bajt. (In Russ.).

11. Criteria for a recommended standard: Occupational exposure to heat and hot environments / B. Jacklitsch, W. J. Williams, K. Musolin, A. Coca, J.-H. Kim, N. Turner // Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH). No. 2016–106. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-106/default.html> URL: https://ru.wikibooks.org/wiki/Защита_работников_от_нагревающего_микроклимата (data obrashhenija 05.02.2023). (In Russ.).

12. Heat and Cold. Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, 4th ed. (4 Vol.) / ed. by J. M. Stellman, 1998. URL: <https://www.goodreads.com/book/show/3978876-encyclopaedia-of-occupational-health-and-safety-4-volume-set> (data obrashhenija 12.02.2023).

13. Simankov D. S. Problem of Brief Interaction of Liquid and Amorphous Bodies // J. of Eng. Phys. and Thermophys. 2016. № 89(1). P. 186–191. doi: 10.1007/s10891-016-1366-z.

14. Simankov D. S. Izmerenie teplovoj aktivnosti poverhnostnyh tkaney mediko-biologicheskogo ob'ekta impul'snym metodom // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. № 3. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13816>. doi: 10.6084/m9.figshare.14527275 (data obrashhenija 12.02.2023). (In Russ.).

15. Simankov D. S. The problem of brief interaction of two amorphous bodies // Thermal Sci. and Engin. Progress. 2021. Vol. 28(1). P. 101174. doi: 10.1016/j.tsep.2021.101174.

Information about the author

Dmitry S. Simankov – postgraduate student of the Physics Department of the Institute of Computer Science and Applied Mathematics, MAI. Moscow Aviation Institute, Volokolamsk highway, 4, Moscow, 125993, Russia.

E-mail: pegasds1@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7970-5422>

Статья поступила в редакцию 30.03.2023; принята к публикации после рецензирования 11.04.2023; опубликована онлайн 23.06.2023.

Submitted 30.03.2023; accepted 11.04.2023; published online 23.06.2023.