Math-Net.Ru
Общероссийский математический портал

Л. П. Филиппов, Использование регулярного режима 3-го рода для измерений тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах,
ТВТ, 1964, том 2, выпуск 5, 817–828

https://www.mathnet.ru/tvt6665

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
https://www.mathnet.ru/rus/agreement

Параметры загрузки:
IP: 18.97.14.83
10 июля 2025 г., 10:41:48

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Том 2 *1964* *№ 5*

ОБЗОР

УДК 53.083:536.2.023+536.2+536.63:546.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА 3-го РОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Л. П. Филиппов

Одним из наиболее важных направлений теплофизики высоких температур являются исследования тепловых свойств твердых и жидких веществ при температурах порядка 1000—3000° С [1]. Задача осуществления высококачественных измерений в этой области температур требует большой и серьезной работы над созданием и развитием экспериментальных методов, приспособленных и предназначенных именно для таких высокотемпературных исследований.

Целью настоящего обзора является систематизация и обобщение сведений об одной из групп экспериментальных методов исследования, применяемых в области высоких температур, а именно методов, основанных на использовании регулярного режима 3-го рода. В этом обзоре автор в значительной мере основывается на личном опыте, приобретенном в процессе творческой работы с группой студентов и аспирантов кафедры молекулярной физики Физического факультета МГУ [2, 3].

Регулярным тепловым режимом 3-го года, как известно, называются установившийся периодический процесс, т. е. периодический процесс в той его стадии, когда пространственно-временные изменения температур системы не зависят от начальных условий [4, 5]. В состоянии регулярного режима 3-го рода изменение температуры в каждой точке системы является строго периодическим, полностью повторяется через каждый период, причем период этот одинаков для всех точек системы.

Основное преимущество использования регулярного режима 3-го рода для тепловых измерений заключается в том, что этот режим дает намного оольшее количество информации о тепловом состоянии системы, чем стационарный или другие нестационарные режимы. Действительно, источниками информации в этом режиме являются: амплитуды периодических изменений температуры (переменные составляющие сигналов от датчиков температуры), их фазы, средние температуры (постоянные составляющие сигналов от датчиков температуры), частотный состав амплитуд и фаз для процессов негармонического характера или частотная зависимость амплитуд и фаз для гармонических процессов. Наличие большого количества информации позволяет:

1) осуществлять весьма разнообразные способы измерения всех основных тепловых свойств,

2) осуществлять методы измерений, допускающие внутренний контроль результатов эксперимента путем сопоставления данных, получаемых при использовании различных источников информации,

3) использовать минимальное количество датчиков,

4) осуществлять комплексные методы измерений, т. е. методы, позво-

ляющие определить все тепловые свойства при помощи одной и той же измерительной системы и, более того, в одном и том же эксперименте.

По-видимому, нет необходимости особо подчеркивать, насколько существенны перечисленные выше положения для области высоких температур. Однако преимущества использования метода регулярного режима 3-го рода этим не исчерпываются. Другим важным свойством этого режима является естественная многократная воспроизводимость получаемых результатов. Результаты измерений оказываются повторенными столько раз, сколько периодов колебаний регистрируется. (Следует учесть при этом, что продолжительность периодов в большинстве случаев невелика.) Наконец, к числу существенных преимуществ рассматриваемого режима следует отнести и то обстоятельство, что роль теплообмена излучением в большинстве методов, использующих этот режим, является весьма небольшой и может быть учтена в качестве малой поправки.

В основе теории всех нестационарных методов измерения тепловых свойств лежит уравнение теплопроводности

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + w, \tag{1}$$

где λ — теплопроводность, c — теплоемкость, ρ — плотность, w — удельная мощность объемного источника тепла.

В качестве граничных условий этого уравнения для области высоких температур используется обычно уравнение теплового баланса на поверхности исследуемого образца

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n} = -q + \alpha(T - T_0), \tag{2}$$

где q — удельная мощность поверхностного источника тепла, T_0 — температура окружающей среды, α — коэффициент теплообмена. (В частном случае для теплообмена излучением $\alpha = \sigma\varepsilon(T^2 + T_0^2)(T + T_0)$, где σ — константа закона Стефана — Больцмана, ε — приведенная степень черноты.) При осуществлении регулярного периодического режима «источниками» периодического воздействия на систему могут быть w, q и T_0, т. е. периодическое изменение мощности внутренних или поверхностных источников тепла или регулярное периодическое изменение температуры окружающей среды. Под действием одной из этих возбуждающих причин в рассматриваемой системе по истечении некоторого времени установится регулярный тепловой режим и изменяющаяся во времени часть температуры в каждой точке среды

$$\theta(\mathbf{r}, t) = T(\mathbf{r}, t) - \overline{T}(\mathbf{r}) \tag{3}$$

будет периодической функцией.

Нахождение явного вида решений уравнения (1) с условием (2) для сопоставимых значений переменной θ и постоянной $\overline{T}$ составляющих температуры является практически невозможным, так как и уравнение (1) и условие (2) в общем случае нелинейны. В силу этого приходится выбирать такие условия осуществления эксперимента, при которых переменная пульсирующая часть температуры является намного меньшей, чем постоянная:

$$\theta / \overline{T} \ll 1. \tag{4}$$

В приближении (4) соответствующая математическая задача может быть линеаризована и ее решения для большинства практически важных случаев получены без большого труда. Важным следствием условия (4) при этом является принцип суперпозиции, согласно которому решение задачи для любого периодического процесса может быть получено в форме суммы частных решений для отдельных его гармонических составляющих.

Это дает возможность ограничить решение каждой конкретной задачи решением для гармонического изменения температуры и использовать в случае необходимости гармонический анализ регистрируемых температурных колебаний.

Рассмотрим вопрос о классификации многообразия способов использования регулярного режима. Возможны различные подходы к этому вопросу. Можно, например, классифицировать методы, взяв за основу то, какая из тепловых характеристик при этом измеряется. Такая классификация, однако, будет неудобной, так как в одну группу при этом попадут методы измерения, имеющие друг с другом мало общего, а методы измерения различных величин, использующие одинаковую измерительную систему, окажутся разобщенными. Поэтому более рациональной представляется иная классификация, а именно: классификация по характеру нагрева. В такой классификации все методы измерения будут разбиты на две большие группы. К первой группе отнесем методы, основанные на нагреве объемными источниками — практически на нагреве электрическим током, пропускаемым через образец. Во вторую группу попадут тогда методы, использующие поверхностный нагрев. При этом к поверхностному нагреву формально можно будет отнести и случай, когда периодическое поле температур создается путем изменения температуры окружающей среды T_0. К методам поверхностного нагрева примыкают и методы, использующие высокочастотный индукционный нагрев. В этом случае тепловыделение близко к чисто поверхностному, но приходится учитывать и поправку на распределение мощности источника в теле образца.

Рассмотрение конкретных экспериментальных методов начнем с группы методов измерения теплоемкости, использующих периодический нагрев электрическим током. В качестве объектов исследования в этих методах используются проволока и фольга, которые нагреваются до высокой температуры при пропускании через них тока. При периодическом изменении мощности тока температура изучаемых объектов наряду с постоянной составляющей (средней температурой) имеет и переменную составляющую (пульсацию температуры). В случае гармонического изменения мощности амплитуда пульсации температуры связана с теплоемкостью материала образца простым соотношением

$$\vartheta = w / Mc\omega, \tag{5}$$

где w — амплитуда пульсации мощности, M — масса образца, ω — круговая частота. Таким образом, для определения теплоемкости этим методом достаточно знать амплитуду пульсации температуры, частоту изменения мощности и электрические величины, определяющие w.

Относительная величина поправки на теплообмен излучением в экспериментах такого рода определяется формулой

$$\xi \simeq 4\vartheta / mT, \tag{6}$$

где m — коэффициент модуляции, т. е. отношение w к постоянной составляющей мощности. При условии соблюдения неравенства (4) величина поправки ξ является весьма малой (следует учесть при этом, что ϑ пропорционально m при заданном T и поэтому уменьшение m не может увеличить ξ по сравнению со случаем $m = 1$). В практически важных случаях условие (4) оказывается выполненным для значений частот модуляции порядка десятков герц, т. е. для звукового диапазона частот. Для таких частот наиболее удобными способами осуществления модуляции являются два: 1) нагрев током, напряжение которого меняется по закону $U = U_= + U_\sim \cos \omega t$, и 2) нагрев переменным током $U = U_\sim \cos \omega t$. В первом способе мощность нагрева, пропорциональная U^2, содержит переменные составляющие основной частоты и гармоники 2ω. Во втором способе модуляции имеется лишь одна переменная составляющая удвоен-

ной частоты (температура изменяется дважды за период). Первый способ позволяет варьировать коэффициент модуляции m, но требует отделения гармоники пульсации температуры (или использования малых m, чтобы этой гармоникой можно было пренебречь); во втором способе коэффициент модуляции равен единице, но зато измеряемый сигнал является гармоническим.

Варианты практического осуществления рассматриваемой методики измерения теплоемкости отличаются друг от друга в первую очередь способом определения величины пульсации температуры. В основе этих различных способов определения пульсации лежат три различных физических явления: температурная зависимость сопротивления образца, электромагнитное излучение в видимом участке спектра и термоэлектронная эмиссия. Остановимся подробнее на реализации каждого из способов применительно к измерениям теплоемкости.

Способ определения пульсаций температуры по изменению сопротивления малоинерционных объектов, нагреваемых переменным током, был предложен еще в 1911 г. Корбино [6]. Этот способ основан на выявлении третьей гармоники переменного напряжения, возникающей за счет температурной зависимости исследуемого сопротивления. (При изменении напряжения с частотой ω мощность, а следовательно, и температура, меняются с частотой 2ω: при изменении сопротивления с частотой 2ω в цепи с напряжением частоты ω образуется комбинационная частота 3ω). Разновидность такого способа определения пульсации температуры была практически использована в работах [7] и [8]. Для высокотемпературных измерений теплоемкости этот способ, однако, применен не был.

В 1962 г. Я. А. Крафтмахер осуществил метод измерений теплоемкости, названный им «модуляционным» [9]. В этом методе был использован нагрев током, содержащим постоянную и переменную компоненты. Исследуемая проволока включалась в плечо уравновешенного моста, а амплитуда изменения сопротивления (и, следовательно, пульсация температуры) определялась путем нахождения реактивного сопротивления, требуемого для балансировки моста (изменение сопротивления за счет пульсации сдвинуто по фазе относительно напряжения и играет поэтому роль реактивной компоненты в импедансе соответствующей цепи). Компенсационный характер измерений является преимуществом этого метода, обеспечивающим воспроизводимость результатов с точностью $\sim 1\%$. Описанным методом осуществлены детальные измерения теплоемкости вольфрама [10], тантала [11], ниобия [12] и молибдена [13] в интервале от $\sim 1000°$ K до температур, близких к точкам плавления этих металлов.

Фотоэлектрический способ измерения пульсации при нагреве переменным током детально изучен в работах [14] и [15], где описаны исследования воспроизводимости результатов при широком варьировании измерительной схемы и условий эксперимента. В частности, дан анализ воспроизводимости результатов в тождественных условиях, сопоставлены данные, полученные с фотоэлементами и фотоумножителями различных типов, приведены результаты, полученные при различных режимах работы регистрирующей схемы, сравнены результаты измерений, проведенных с различными светофильтрами и без них, описаны эксперименты, посвященные выявлению роли теплоотвода с концов исследуемого объекта и т. п. При этом показано, что воспроизводимость результатов в среднем составляет 0,5%. Эта методика измерений пульсации использована для определения теплоемкости вольфрама. Аналогичный способ измерений описан также Лоуэнталем [16]; помимо описания методики, в его работе приведены результаты измерений теплоемкости вольфрама, молибдена, тантала и ниобия.

Способ определения пульсаций температуры по термоэлектронной эмиссии основан на регистрации колебаний анодного тока двухэлектродной электронной лампы, катодом которой является исследуемая проволока,

нагреваемая переменным током. Измерения такого рода были осуществлены Цвиккером еще в 1928 г. [17]. Сопоставление этого метода с методом фотоэлектрической регистрации пульсаций проведено в работе [15], где описаны эксперименты, выполненные обоими методами с одним и тем же объектом. При этом показано, что оба метода дают результаты, хорошо согласующиеся друг с другом, но предпочтение отдается фотоэлектрическому методу, как более удобному.

Подводя итоги обзору этого круга работ, отмечаем, что рассматриваемые методы измерения теплоемкости, использующие переменный нагрев малоинерционных объектов, без труда позволяют производить измерения до температур, близких к температурам плавления исследуемых металлов. Соответствующие экспериментальные установки получаются малогабаритными, потребляют очень мало энергии. Вследствие малости объектов рабочие частоты используемых напряжений лежат в звуковой области, что дает возможность в схемах регистрации температурных пульсаций широко применять средства низкочастотной радиотехники. Все это вместе взятое позволяет сочетать простоту измерений с высокой точностью получаемых результатов. Таким образом, есть все основания для того, чтобы рекомендовать эту группу методов для широкого использования.

Возможность применения способа непосредственного нагрева исследуемых образцов пропускаемым через них током не ограничивается методами измерения теплоемкости. Этот способ может быть использован и для определения температуропроводности в экспериментах, представляющих собой нестационарную разновидность хорошо известного метода измерения теплопроводности Кольрауша [23]. Как и в обычном методе Кольрауша, исследуемый образец в форме стержня должен быть закреплен в теплопроводящих цангах, а датчики температуры — термопары — должны быть расположены вблизи середины образца. В нестационарном варианте сила тока, пропускаемого через образец, должна периодически менять свою величину (проще всего, конечно, использовать режим включено — выключено). При этом температура в каждой точке стержня будет также периодически изменяться вокруг некоторого среднего значения — постоянной составляющей температуры. По величине постоянной составляющей можно определить теплопроводность материала как и в обычном стационарном варианте метода Кольрауша. Переменная же составляющая температуры позволяет определить температуропроводность, причем двояким образом: по амплитуде колебаний температуры и по разности фаз между колебанием температуры и изменением мощности. Анализ соответствующих формул приводит к выводу, что оба варианта определения температуропроводности — «амплитудный» и «фазовый» — могут обеспечить достаточно высокую точность измерения температуропроводности (2—6%). Рабочие частоты при этом должны лежать в пределах от 1 до 0,02 *гц*. Существенно, что в экспериментах такого рода могут быть использованы без существенной переделки имеющиеся экспериментальные установки, работающие по методу Кольрауша. Требуют изменений (дополнений) лишь регистрирующая схема и схема питания. Осуществление такой комплексной методики измерений представляется перспективным и работа в этом направлении весьма желательной.

Перейдем к рассмотрению второй большой группы методов — с поверхностным нагревом. Пространственно-временное распределение температур в теле изучаемых объектов в этих методах описывается уравнением теплопроводности без источников. Это уравнение содержит лишь одну теплофизическую константу — температуропроводность. Таким образом, путем измерения изменений температуры в образце можно определить его температуропроводность, но не теплопроводность. Определение теплопроводности и теплоемкости возможно, однако, если наряду с полем температур в образце измеряется и мощность, вводимая в образец. В этом случае методы такого рода могут быть реализованы и как комплексные, как методы

определения всей совокупности теплофизических свойств в одном эксперименте.

Рассматриваемую группу методов целесообразно разделить на три подгруппы в зависимости от симметрии температурного поля: плоской, цилиндрической и сферической.

В методах с плоской симметрией периодическому нагреву подвергается одна из поверхностей пластины, поперечные размеры которой достаточно велики, чтобы распределение температур можно было бы считать одномерным. При этом в пластине распространяются так называемые температурные волны, теория которых хорошо известна [18, 19]. Величина температуропроводности в методе плоских температурных волн может быть определена двумя независимыми способами: по амплитудам температурных колебаний и по их фазам. В первом случае измерению подлежат амплитуды колебаний температуры в двух точках образца, во втором — разность фаз между ними. Метод плоских температурных волн в описанном виде применяется, как правило, для исследования неметаллических веществ. Однако недавно он был осуществлен и для металлов О. А. Краевым и А. А. Стельмах [20]. В их эксперименте исследуемый образец представлял собой тонкую металлическую пластину, одна сторона которой подвергалась нагреву путем электронной бомбардировки; величина этого нагрева периодически изменялась. Температуропроводность определялась по разности фаз между изменением мощности и колебанием температуры на противоположной стороне пластинки. Для получения достаточной разности фаз частоты модуляции электронного потока выбраны в области звуковых частот. Существенно, что при этом является малой роль теплоотдачи с поверхности пластины. Метод позволяет измерять температуропроводность в интервале температур 1600—3000° С и является, по-видимому, самым «высокотемпературным» из известных до настоящего времени. Следует заметить, что возможности метода плоских температурных волн здесь отнюдь не являются исчерпанными. Весьма привлекательным представляется, в частности, использование эксперимента, подобного [20], для комплексных измерений теплопроводности и температуропроводности, чего можно достичь, если наряду с разностью фаз измерять также абсолютную амплитуду пульсации температуры при известной амплитуде пульсаций мощности (для теплоизоляторов при низких температурах такой комплексный метод осуществлен Е. М. Кравчуком [21, 22]).

К методам плоских температурных волн примыкают и методы, использующие температурные волны, распространяющиеся вдоль оси металлических стержней. Хотя, строго говоря, такие волны не являются плоскими ввиду существования теплообмена на боковой поверхности стержней, их можно рассматривать как почти плоские, так как градиенты температуры по радиусу обычно невелики. Теория таких (будем называть их осевыми) температурных волн основывается на решении одномерного уравнения теплопроводности, в которое включается член, учитывающий теплоотдачу с боковой поверхности [23]. В отличие от плоских температурных волн решение задачи для осевых волн содержит не одну, а две теплофизические константы: температуропроводность и константу теплообмена, равную отношению коэффициента теплообмена к коэффициенту теплопроводности. Определение температуропроводности требует исключения константы теплообмена, что может быть сделано разными способами. Так, константа теплообмена может быть исключена при использовании результатов измерения амплитуд температурных волн при двух частотах [24], фаз при двух частотах [25], амплитуд и фаз при одной частоте [23, 26, 29, 31 и др.]. Последний способ является более распространенным и, по-видимому, более удобным, чем предыдущие, так как измерения при этом не разделены во времени. Перечисленные способы не исчерпывают всех имеющихся в этом отношении возможностей. Так, представляет интерес опробовать способ исключения константы теплообмена, использующий наряду со сведениями об

амплитуде и фазе температурной волны еще и данные о постоянной составляющей температуры (об изменении средней температуры вдоль стержня). Наконец, следует остановиться на иной возможности исключения теплообмена — создании такого режима работы установки, при котором величина теплообмена сказывалась бы на результатах измерений лишь как малая поправка. Анализ вопроса приводит к выводу, что этого можно достичь при использовании температурных волн с периодами порядка 5—30 *сек*, т. е. значительно меньшими, чем обычно применяемые. Такой режим был использован впервые в работе Эйблса и др. [30]. Детальное изучение открывающихся при этом возможностей проделано А. Н. Нурумбетовым и др. [31, 32, 2, 3]. В результате этой работы было выяснено, что реальным является осуществление такого режима, при котором влияние теплообмена с боковой поверхности исследуемого образца носит характер малой поправки вплоть до температур $\sim 2000°$. Открывающаяся при этом возможность раздельного определения температуропроводности по амплитудам и фазам температурных волн существенно упрощает методику измерений и делает ее внутренне контролируемой. Кроме того, использование малых периодов дает возможность получать температурные колебания в образце весьма близкими к синусоидальным, несмотря на п-образное изменение мощности на конце стержня (включение — выключение). Это позволяет обойтись при обработке результатов без трудоемких методов гармонического анализа. Наконец, имеется еще одно преимущество у такого режима: вследствие значительного затухания используемых температурных волн длина образца может быть взята значительно меньшей, чем обычно, порядка нескольких сантиметров (вместо десятков сантиметров при использовании обычных режимов).

Изложенное выше относилось к использованию осевых температурных волн для измерений температуропроводности. Однако, как уже отмечалось, наряду с этими измерениями та же схема эксперимента позволяет получать и данные о теплопроводности, если при этом известны переменная составляющая мощности, вводимой в образец, и абсолютные значения колебаний температуры. Основной экспериментальной трудностью, встречающейся при осуществлении такого комплексного способа определения тепловых свойств, является определение мощности. Использование для этой цели внешних электрических нагревателей, даже малоинерционных, является неприемлемым из-за относительно большой роли теплового сопротивления на границе металл — нагреватель для переменной составляющей температуры. Задача, однако, может быть решена путем использования электронного нагрева, позволяющего достаточно точно дозировать тепловой поток, вводимый в образец [34]. Методика комплексного измерения тепловых свойств твердых металлов при помощи осевых температурных волн недавно реализована автором и А. Н. Нурумбетовым. В установке использован нагрев образца в форме стержня электронной бомбардировкой от катода, расположенного вблизи торца стержня. Модуляция нагрева осуществляется периодическим включением и выключением анодного напряжения. Изучение работы этой установки (вариация размеров образца, мощности нагрева, формы электрического поля, частоты модуляции и т. п.) приводит к выводу о том, что такая методика измерений дает вполне достоверные экспериментальные данные как в отношении температуропроводности, так и в отношении теплопроводности и может быть рекомендована для использования в области температур до 1600° С.

Перейдем далее к рассмотрению температурных волн цилиндрической симметрии. В отличие от осевых температурных волн амплитуда и фаза колебаний температуры в этом случае изменяются не по оси, а по радиусу цилиндра; цилиндрические температурные волны поэтому получили название радиальных [35—39]. Важной особенностью радиальных температурных волн является то обстоятельство, что в силу их цилиндрической симметрии условия теплообмена на боковой поверхности исследуемого цилинд-

ра не влияют на относительное пространственно-временно́е распределение температуры в объеме цилиндра. Условия на боковой поверхности определяют лишь величину амплитуды колебаний температуры, но не изменения ее с координатой и временем. По этой же причине относительное пространственно-временно́е распределение температуры в цилиндре не меняется, если цилиндр окружить однородной оболочкой из материала с иными тепловыми свойствами. Это обстоятельство является ценным при работе с жидкими металлами; стенки тигля, в котором находится жидкий металл, играют косвенную роль (они изменяют амплитуду колебаний температуры, но не относительное поле температур).

Другое важное свойство осевых температурных волн заключается в том, что влияние торцовых поверхностей цилиндров в соответствующих экспериментах является очень малым и может не учитываться даже в случае, когда длина цилиндра лишь в три раза превышает его диаметр [36]. Это разительно контрастирует с аналогичными оценками для стационарного режима.

На практике возможно использовать два типа радиальных температурных волн — волны, распространяющиеся снаружи цилиндра внутрь, и волны, распространяющиеся с внутренней поверхности полого цилиндра к его внешней поверхности. Решение соответствующих математических задач в обоих случаях достаточно просто, хотя формулы для второго случая, естественно, получаются более громоздкими [39, 41, 42].

При использовании радиальных температурных волн для определения температуропроводности могут быть осуществлены два независимых варианта измерения — амплитудный и фазовый. В амплитудном варианте температуропроводность определяется по отношению амплитуд колебаний температуры в двух точках цилиндрического образца, во втором варианте — по разности фаз этих колебаний. Измерения температуропроводности неметаллических материалов при помощи радиальных температурных волн описаны в работах Ю. А. Кириченко [35—37] и Ван Зи и Бэбкока [40]. Исследованию возможностей использования этого метода применительно к твердым и жидким металлам посвящена работа [38]. В этой работе детально изучены как амплитудный, так и фазовый варианты определения температуропроводности при использовании внешнего нагрева. При этом показано, что оба варианта дают экспериментальные данные, хорошо согласующиеся друг с другом; максимальная погрешность результатов в интервале температур до 1000° С не превышает 7%. Достоверность получаемых данных подтверждается их воспроизводимостью при варьировании периодов температурных волн и геометрических размеров исследуемых образцов. Как и в методе осевых температурных волн с малыми периодами, колебания температуры в этих экспериментах оказываются весьма близкими к синусоидальным даже при п-образном изменении тока через нагреватель. Рассматриваемая методика измерений применена как к твердым, так и жидким металлам. При работе с жидкими металлами использовались тонкостенные цилиндрические тигли из тантала. В последующей работе тех же авторов [39] описаны эксперименты с двумя разновидностями метода — с наружным и внутренним нагревом. При этом каждая из этих разновидностей осуществлена в свою очередь в двух вариантах — амплитудном и фазовом. Полученные во всех случаях данные хорошо согласуются друг с другом. В этой же работе приведены результаты измерений температуропроводности твердых и жидких свинца, олова, висмута и кадмия.

При использовании радиальных температурных волн для определения иных тепловых характеристик материала и для осуществления измерений комплекса тепловых свойств, как и в методе осевых температурных волн, целесообразно использовать электронный нагрев, позволяющий достаточно просто определить вводимую в исследуемый образец энергию.

Использование периодического электронного нагрева цилиндрических образцов для измерений теплоемкости описано в [43]. В этой работе рассмотрены теория и осуществление двух вариантов такой методики — с электронным нагревом внешней поверхности цилиндрического образца и с внутренним электронным нагревом полого цилиндра. В обоих вариантах теплоемкость может быть определена по величине пульсации температуры в одной точке и известной переменной составляющей мощности. При этом эксперимент может проводиться и в таком режиме, когда по радиусу образца имеются заметные градиенты температуры; поправка на величину температуропроводности невелика и может быть учтена расчетным путем.

В отличие от измерений температуропроводности в экспериментах, связанных с учетом величины мощности, условия теплообмена на боковой поверхности цилиндра не являются безразличными. Существенно, однако, что, как показано в [43], при измерениях теплоемкости роль теплообмена излучением может быть сведена к малой поправке при температурах $\sim 2000°$ С. Рассматриваемая методика измерения теплоемкости опробована в применении как к твердым, так и к жидким металлам. При этом показано, что максимальная погрешность измерений составляет 3—3,5% в области температур $\sim 1000°$ С. Достоверность получаемых результатов подтверждена измерениями, выполненными при разных мощностях нагрева, разных периодах и с образцами различных размеров, а также согласием результатов, полученных в двух вариантах методики — с внутренним и наружным нагревом.

Следующим шагом развития методов определения тепловых свойств при помощи радиальных температурных волн является объединение измерений температуропроводности и теплоемкости в одном эксперименте, т. е. осуществление комплексной методики измерений. Это сделано недавно в работе, выполненной автором совместно с Р. П. Юрчаком. В этой методике также используется электронный нагрев образца, причем во внутреннем варианте катод находится внутри сверления в твердом образце или внутри тигля, представляющего собой две коаксиальные тонкостенные трубки из тантала, промежуток между которыми заполняется исследуемым жидким металлом. (Комплексная методика может быть осуществлена и с наружным электронным нагревом, однако вариант с внутренним нагревом обладает рядом преимуществ конструктивного характера.) Датчиком температуры является одна единственная термопара, измеряющая температуру внешней поверхности образца. Теплоемкость определяется по мощности переменного нагрева и амплитуде колебаний температуры. Температуропроводность находится по разности фаз между изменением мощности и колебанием температуры. Такая методика измерений опробована для твердых и жидких металлов при температурах около 1000° С. При этом получена хорошая воспроизводимость результатов при варьировании периода процесса, мощности электронного нагрева, геометрических размеров. В настоящее время эта методика используется для систематических измерений комплекса тепловых свойств жидких металлов. Одновременно начата работа и в направлении дальнейшего развития этой методики применительно к области намного более высоких температур. Для этой цели будет использован способ бесконтактной, фотоэлектрической регистрации колебаний температуры.

К описанной группе методов, использующих цилиндрические волны, примыкает методика измерения температуропроводности с периодическим нагревом цилиндрического образца в высокочастотной индукционной печи [44—46]. Отличие заключается в том, что индукционный нагрев является не строго поверхностным, поэтому приходится учитывать распределение выделенной энергии по объему образца. Однако вследствие того, что толщина скин-слоя для металлов с относительно высокой электропроводностью сравнительно мала (для несущих частот печи — порядка сотен *кгц* и выше), влияние объемного эффекта может быть учтено в форме поправ-

ки; нагрев является почти поверхностным [44]. В рассматриваемой методике исследуемый образец, представляющий собой стержень диаметром 8—15 *мм*, помещается по оси индукционной печи, причем высокочастотное напряжение в индукторе периодически включается и выключается при помощи специального модулирующего устройства (в принципе возможна и непрерывная модуляция). Колебания температуры боковой поверхности стержня регистрируются бесконтактным, фотоэлектрическим методом. Непосредственным результатом эксперимента являются осциллограммы с записью колебаний температуры и отметками включения и выключения напряжения в индукторе [45]. Как показывает теория метода [44], возможны два независимых способа определения температуропроводности из таких экспериментов — фазовый и амплитудный. В фазовом способе температуропроводность определяется по разности фаз между первыми гармониками периодических кривых изменения мощности и температуры. В амплитудном способе необходимо знание зависимости амплитуды колебаний температуры от частоты модуляции, для чего должны быть сняты осциллограммы при нескольких (как минимум — двух) частотах. Как и во всех методах определения температуропроводности, оба способа не требуют знания абсолютных значений колебаний температуры. Существенно, что несмотря на регистрацию лишь одной поверхностной температуры, роль теплообмена излучением на поверхности образца является пренебрежимо малой.

Оба варианта рассматриваемого метода были подвергнуты обстоятельному экспериментальному изучению. Была проверена воспроизводимость результатов для образцов разных размеров, для различных частот модуляции (в фазовом варианте), для разных режимов модуляции (различное соотношение между периодами включения и выключения), сопоставлены результаты фазового и амплитудного способов, оценена роль ряда вторичных факторов [45, 46]. В результате этой работы было установлено, что оба варианта методики пригодны для определения температуропроводности с максимальной погрешностью от 4 до 8%. При этом фазовый вариант оказывается несколько более простым в отношении обработки, так как каждое значение разности фаз дает непосредственно искомую температуропроводность, в то время как в амплитудном варианте обработке подлежит обязательно серия изменений при разных частотах модуляции. Процесс измерения занимает сравнительно мало времени, установка оказывается достаточно простой, методика не имеет существенных ограничений по температуре (при работе с индукционной печью МВП-5 верхний предел температур равен приблизительно 2000° К). В настоящее время описанная методика используется для систематических исследований теплопроводности металлов при высоких температурах. Особенно привлекательным представляется ее применение к жидким металлам. Работа в этом направлении ведется. В дальнейшем не исключено развитие этой методики и как комплексной. Для одновременного определения температуропроводности и теплопроводности потребуется определение абсолютных значений пульсаций температуры, что не представляет существенной трудности, а также измерение мощности, вводимой в образец. Последнюю величину можно получить расчетным путем по напряженности поля в индукторе и электропроводности исследуемого материала; возможно определение мощности и по известной степени черноты поверхности образца.

Наконец, рассмотрим использование температурных волн еще одного типа симметрии — сферических. Осуществление чисто сферических температурных волн едва ли удобно на практике. Значительно более удобным является создание полусферических волн — волн, распространяющихся в глубь плоской поверхности образца от источника, близкого к точечному. При этом предполагается, что остальные поверхности образца удалены от источника настолько, что температурная волна до них практически не доходит (или что источник находится в центре полусферы). Изучение

возможностей использования такой системы для измерений тепловых свойств в настоящее время ведется автором. В осуществленном эксперименте источником тепла являлся отрезок проволоки, приваренный к исследуемому образцу (железо). Периодическим включением через эту проволоку тока силой в несколько ампер создается локальный периодический нагрев образца от места контакта с проволокой. В толщу образца при этом распространяется полусферическая температурная волна, амплитуда и фаза которой определяются температуропроводностью материала. При соответствующем выборе частоты колебаний величина теплообмена на поверхности образца играет пренебрежимо малую роль. В этих условиях температуропроводность может быть определена двумя независимыми путями: по амплитудам колебаний температуры в двух точках поверхности образца на различных расстояниях от источника или по фазам этих колебаний. Есть все основания считать, что такого рода измерения могут давать достаточно надежный экспериментальный материал, причем метод сулит быть удобным и для жидких металлов — нагреватель и датчики температуры в этом случае располагаются над открытой поверхностью металла и искажающее влияние стенок сосуда оказывается минимальным.

Заканчивая обзор методов, использующих регулярный режим 3-го рода, укажем на перспективы их дальнейшего развития. По нашему мнению, они связаны с совершенствованием методов комплексного определения тепловых свойств, с развитием высокотемпературных методов измерения тепловых свойств жидких металлов и, наконец, с осуществлением методов непрерывного измерения температурной зависимости теплофизических коэффициентов в квазирегулярном режиме.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию
20 VI 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Кириллин, Теплофизика высоких температур, 1, № 1, 3, 1963.
2. Л. П. Филиппов, Вестн. МГУ, № 4, 1964.
3. Л. П. Филиппов, Об измерении тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах, Доклады 2-го Всес. совещ. по тепло- и массообмену, Минск, 1964.
4. Г. М. Кондратьев, Регулярный тепловой режим. М., 1954.
5. Г. М. Кондратьев, Тепловые измерения. М.— Л., 1957.
6. O. M. Corbino, Phys. Z., 12, 292, 1911.
7. Л. П. Филиппов, Инж.-физ. ж., 3, № 7, 121, 1960.
8. Л. М. Возженникова, Дипломная работа, МГУ, 1957.
9. Я. А. Крафтмахер, Прикл. матем. и техн. физ., № 5, 176, 1962.
10. Я. А. Крафтмахер и П. Г. Стрелков, Физика твердого тела, 4, 2271, 1962.
11. Я. А. Крафтмахер, Прикл. матем. и техн. физ., № 2, 158, 1963.
12. Я. А. Крафтмахер, Физика твердого тела, 5, 950, 1963.
13. Я. А. Крафтмахер, Физика твердого тела, 6, № 2, 503, 1964.
14. Н. А. Тугарева, Дипломная работа, МГУ, 1962.
15. Л. П. Филиппов, Н. А. Тугарева, Л. И. Маркина, Инж.-физ. ж., № 6. 1964.
16. C. C. Lowenthal, Aust. J. Phys., 16, 47, 1963.
17. C. Zwikker, Z. Phys., 52, 668, 1928.
18. А. В. Лыков, Теплопроводность нестационарных процессов, М.— Л., 1948.
19. А. В. Лыков, Теория теплопроводности, М., 1952.
20. О. А. Краев и А. А. Стельмах, Теплофизика высоких температур, 1, № 1, 8, 1963.
21. Е. М. Кравчук, Инж.-физ. ж., 5, № 1, 59, 1962.
22. Е. М. Кравчук, Инж.-физ. ж., 6, № 7, 3, 1963.
23. В. Е. Микрюков, Теплопроводность и электропроводность металлов и сплавов, М., 1959.
24. G. Starr, Rev. Sc. Instr., 8, 61, 1937.
25. W. King, Phys. Rev., (2), 6, 437, 1915.
26. P. H. Sidles, Gc. Danielson, J. Appl. Phys., 25, 58, 1954.
27. Е. Г. Швидковский, Ж. техн. физики, 8, № 10, 935, 1938.

28. И. И. Новиков, А. П. Соловьев, Е. М. Хабахпашева, В. А. Груднев, А. И. Приданцев, М. Я. Васенина, Атомная энергия, № 4, 92, 1956.
29. И. И. Руднев, В. С. Ляшенко, М. Д. Абрамович, Атомная энергия, № 3, 230, 1961.
30. B. Abeles, G. D. Cody, D. S. Beers, J. Appl. Phys., 31, № 9, 1585, 1960.
31. J. Martinet, Contribution à létude de la thermocinetique; Les méthodes transitoires ét leurs applications. Thèse, doct. sci. phys. Fac. Sci. Univ., Paris, 1960.
32. А. Н. Нурумбетов и Л. П. Филиппов, Передовой научн.-техн. опыт, 1964 (в печати).
33. Е. В. Третьякова, Дипломная работа, МГУ, 1963.
34. Е. В. Кудрявцев, К. Н. Чаколев и Н. В. Шумаков, Нестационарный теплообмен, М., 1961.
35. Ю. А. Кириченко, Измерительная техника, № 5, 29, 1960.
36. Ю. А. Кириченко, Тр. ин-тов Гос. Ком-та стандартов, мер и измерительных приборов, № 51, 138, 1961.
37. Ю. А. Кириченко, В сб. «Тепло- и массоперенос», 1, Минск, 1962.
38. Р. П. Юрчак и Л. П. Филиппов, Инж.-физ. ж., № 4, 84, 1964.
39. Р. П. Юрчак и Л. П. Филиппов, Теплофизика высоких температур, 2, № 5, 1964.
40. A. F. Van Zec, C. L. Babcock, J. Amer. Ceram. Sos., 34, 244, 1951.
41. V. Vodicka, Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn., 6, 177, 1948.
42. V. Vodicka, Appl. sci. Res. (A), 5, 268, 1955.
43. Л. П. Филиппов и Р. П. Юрчак, Вестник МГУ, 1964 (в печати).
44. Л. П. Филиппов и Л. А. Пигальская, Теплофизика высоких температур, 2, № 3, 1964.
45. Л. А. Пигальская и Л. П. Филиппов, Теплофизика высоких температур, 2, № 4, 1964.
46. В. Д. Борисов, Дипломная работа, МГУ, 1963.