

И.А. Короткий

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДВУХ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ, ЖИДКИХ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Методы двух температурно-временных интервалов позволяют определять теплофизические характеристики с высокой степенью точности. Они универсальны для теплофизических исследований различных групп материалов. Эти методы являются комплексными и скоростными.

Статья содержит теоретические основы первого буферного метода двух температурно-временных интервалов и описание методики его практической реализации для экспериментального определения теплофизических характеристик твердых, жидких и сыпучих материалов.

Теплофизические характеристики, теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, метод двух температурно-временных интервалов.

Теплофизические характеристики являются базовыми величинами при расчетах технологических процессов, связанных с температурными воздействиями на обрабатываемый продукт или материал, а также при проектировании машин и аппаратов, в которых эти процессы осуществляются. Для химически однородных веществ величины, характеризующие теплофизические свойства, определены и стандартизованы, существуют расчетные методы, с помощью которых определяются теплофизические характеристики с достаточной для инженерных расчетов степенью точности [1].

В многокомпонентных, гетерогенных, полидисперсных системах - твердых телах разнообразной структуры, жидких растворах различной конфигурации, которые могут иметь газовые включения, передача теплоты осуществляется теплопроводностью и конвекцией. Соотношения тепловой энергии, переданной теплопроводностью и конвективной составляющей, зависят не только от соотношения компонентов и их фазовых состояний, но и от структуры системы. Поэтому аналитические методики определения теплофизических характеристик, основанные на данных компонентного состава такой системы, дают достаточно приблизительное соответствие теплофизических характеристик полученных расчетными методами и их действительных значений. В связи с этим для определения теплофизических характеристик таких материалов необходимо, помимо аналитических методик, использовать и экспериментальные способы теплофизических исследований в лабораторных условиях.

При этом желательно, чтобы техника измерений и методика обработки экспериментальных данных были достаточно простыми, а сами методики экспериментальных исследований были комплексными, т.е. позволяющими определять все теплофизические характеристики в одном эксперименте на одном образце [2].

Методы двух температурно-временных интервалов относятся к скоростным методам определения теплофизических характеристик, позволяют в одном опыте определять температуропроводность a , теплопроводность λ , объемную теплоемкость c_V

твердых, жидких, сыпучих материалов при температурах выше и ниже криоскопической точки. Теоретические основы методов двух температурно-временных интервалов изложены в литературе [3].

Наилучшим образом для практического использования подходит первый буферный метод двух температурно-временных интервалов.

Рассмотрим систему тел, состоящую из полужограниченного цилиндра B (теплоприемника), пластины M (исследуемого материала) и нагревателя (рис. 1). Все элементы системы имеют идеальный тепловой контакт друг с другом. Теплообмен между элементами системы и внешними объектами отсутствует.

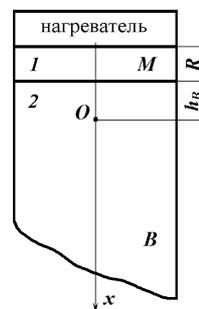


Рис. 1. Принципиальная схема первого буферного метода двух температурно-временных интервалов

Начальная температура системы принята за начало отсчета и равна t_0 . В начальный момент времени свободная поверхность системы мгновенно нагревается до температуры t_n , которая поддерживается постоянной. Зависимость от времени τ температуры t в некоторой точке O , находящейся в теплоприемнике B на расстоянии x от рабочей поверхности, определяется из дифференциального уравнения теплопроводности в виде [4]:

$$\frac{\partial t_i(x, \tau)}{\partial \tau} = a_i \frac{\partial^2 t_i(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где a_i - коэффициент температуропроводности, i - среда 1, 2 (рис. 1).

Начальные и граничные условия, соответствующие рассматриваемой задаче, формулируются следующим образом:

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = 0; \quad (2)$$

$$t_1(0, \tau) = t_n = const; \quad (3)$$

$$t_2(\infty, \tau) = 0; \quad (4)$$

$$t_1(R, \tau) = t_2(R, \tau); \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1(R, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2(R, \tau)}{\partial x}, \quad (6)$$

где λ_1, λ_2 - коэффициенты теплопроводности исследуемого материала и теплоприемника.

Решение уравнения (1) с учетом граничных условий (2÷6), полученное с помощью интегрального преобразования Лапласа [5] формулируется следующим образом:

$$\frac{t_n - t}{t_n} = \left(1 + \frac{\lambda/(b\sqrt{a}) - 1}{\lambda/(b\sqrt{a}) + 1} \sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda/(b\sqrt{a}) - 1}{\lambda/(b\sqrt{a}) + 1} \right)^k \operatorname{erfc} \left(\frac{R}{2\sqrt{a\tau}} \left(\frac{h_B}{R} \sqrt{\frac{a}{a_B}} + 1 + 2 \cdot k \right) \right) \right), \quad (7)$$

где t - температура точки O буферного слоя; λ - теплопроводность исследуемого объекта; a - температуропроводность исследуемого объекта; R - толщина исследуемого объекта; h_B - толщина буферного слоя; a_B - температуропроводность теплоприемника; $b = \lambda_B / \sqrt{a_B}$ - постоянная теплоприемника, λ_B - температуропроводность теплоприемника; m - число элементов ряда.

Собственно выражение (7) представляет собой закон изменения температуры в буферном слое. Если известны вводные величины и характеристики теплоприемника, то в формуле (7) два неизвестных значения - теплопроводность λ и температуропроводность a объекта исследования. Таким образом, для того чтобы определить эти величины, необходимо получить экспериментальную зависимость изменения температуры в буферном слое, выбрать из этой зависимости две точки с координатами τ_1, t_1 и τ_2, t_2 , подставить значения этих координат в уравнение (7). Таким образом, получив систему уравнений вида:

$$\begin{cases} \frac{t_n - t_1}{t_n} = \left(1 + \frac{\lambda/(b\sqrt{a}) - 1}{\lambda/(b\sqrt{a}) + 1} \sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda/(b\sqrt{a}) - 1}{\lambda/(b\sqrt{a}) + 1} \right)^k \operatorname{erfc} \left(\frac{R}{2\sqrt{a\tau_1}} \left(\frac{h_B}{R} \sqrt{\frac{a}{a_B}} + 1 + 2 \cdot k \right) \right) \right), \\ \frac{t_n - t_2}{t_n} = \left(1 + \frac{\lambda/(b\sqrt{a}) - 1}{\lambda/(b\sqrt{a}) + 1} \sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda/(b\sqrt{a}) - 1}{\lambda/(b\sqrt{a}) + 1} \right)^k \operatorname{erfc} \left(\frac{R}{2\sqrt{a\tau_2}} \left(\frac{h_B}{R} \sqrt{\frac{a}{a_B}} + 1 + 2 \cdot k \right) \right) \right) \end{cases}, \quad (8)$$

можно определить искомые величины коэффициентов теплопроводности и температуропроводности. Система уравнений (8) не имеет аналитического решения относительно λ и a , однако легко решается численными методами.

Экспериментальное определение значений теплофизических характеристик методом двух температурно-временных интервалов с использованием системы уравнений (8) возможно при соблюдении следующих условий.

1. Тепловой поток распространяется только в одном направлении x (рис. 1). Для осуществления

на практике одномерности теплового потока необходимо, чтобы боковая поверхность теплоприемника и исследуемого образца имели хорошую тепловую изоляцию. Чем совершеннее тепловая изоляция, тем ближе распределение температуры исследуемого образца к распределению температуры в безграничной пластине. Если длина и ширина образца много больше его толщины, то качество теплоизоляции мало влияет на результаты измерений. Теплоприемник также должен иметь теплоизоляцию. Чем меньше диаметр теплоприемника, тем совершеннее должна быть теплоизоляция. Условие одномерности теплового потока также требует соответствия поперечных размеров теплоприемника и исследуемого образца.

2. В соответствии с условием (2) в начальный момент времени вся система должна иметь одинаковую температуру, принимаемую за начало отсчета. Термометрическая система готова к измерениям, если значения температур в теплоприемнике статичны как по времени, так и по координатам. Для определения готовности термометрической системы к измерениям целесообразно предусмотреть установку дополнительной термопары на свободном торце теплоприемника. Термометрическая система готова к измерениям, если температуры поверхности нагревателя, буферного слоя и свободного торца теплоприемника одинаковы и не изменяются во времени.

3. В соответствии с условием (3) температура слоя, соприкасающегося с поверхностью нагревателя в любой момент времени должна быть постоянной и равняться температуре нагревателя. Это условие требует достаточной мощности нагревателя и малой его инерционности. Кроме того, нагреватель должен обладать точным устройством термостатирования для поддержания постоянства его температуры во время проведения опыта. К тому же поверхность нагревателя и прилегающая к нему поверхность исследуемого образца должны иметь хороший тепловой контакт. Для достижения хорошего теплового контакта необходимо предусмотреть в конструкции прибора прижатие теплоприемника и нагревателя к образцу, а также использование смазки, обладающей высокой теплопроводностью.

4. Граничное условие (4) требует, чтобы за время опыта тепловой поток не достигал конца теплоприемника, т.е. пока температура свободного торца теплоприемника остается неизменной. Поэтому установка термопары на свободном торце теплоприемника также целесообразна для определения времени окончания эксперимента.

При составлении системы уравнений (8) из выражения (7) необходимо задаться величиной m - количеством элементов ряда. На рис. 2 в графической форме представлены результаты расчета изменения температуры точки O буферного слоя в системе, схематичное изображение которой приведено на рис. 1. Кривые 0÷5 построены аналитически по уравнению (7). Номер кривой соответствует числу m . Коэффициенты температуропроводности и теплопроводности материала $a = 1,43 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$,

$\lambda=0,597 \text{ Вт/(м·К)}$ были заданы произвольно, эти коэффициенты соответствуют теплофизическим характеристикам воды при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$, толщина слоя материала $h=0,005 \text{ м}$. При использовании теплоприемника, выполненного из оргстекла, температуропроводность его $a_B=0,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, постоянная теплоприемника $b=642,2 \text{ Вт·с}^{0,5}/\text{К}$. Толщина буферного слоя $h_B=0,005 \text{ м}$. Из приведенных результатов видно, что при $m \geq 3$ кривые практически идентичны. Поэтому в данном случае для рассмотренных условий материала достаточным количеством элементов ряда в формуле (7) является $m=3$.

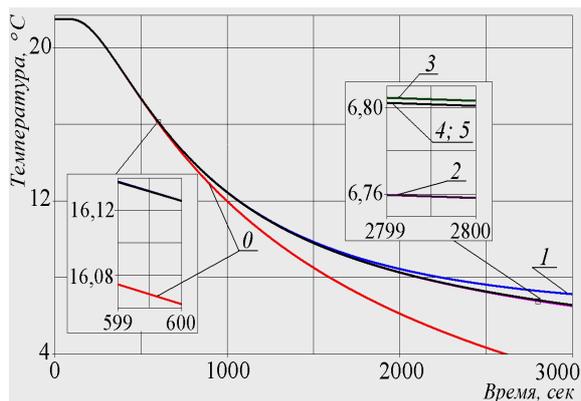


Рис. 2. Расчетное изменение температуры точки О буферного слоя в зависимости от времени, определенное по уравнению (7); номер кривой на рисунке соответствует числу m первых элементов ряда, используемых в уравнении (7) для получения аналитической зависимости

Рассмотрим, как влияют характеристики исследуемого материала на необходимое количество элементов ряда, используемых в системе уравнений (8). Для этого рассчитали по формуле (7) значения температур в буферном слое теплоприемника в момент времени $\tau=1800$ секунд от начала эксперимента. Принимали толщину слоя исследуемого материала $R=5 \text{ мм}$, значения теплопроводности λ и температуропроводности a материала, необходимые для расчета значения температуры в буферном слое изменяли в диапазоне $\lambda=0,04 \div 100 \text{ Вт/(м·К)}$, $a=4 \cdot 10^{-8} \div 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Температуру нагревателя принимали $t_n=20 \text{ }^\circ\text{C}$. Количество элементов ряда в формуле (7) принимали $m=2 \div 6$. Полученное значение температуры сравнивали со значением, определенным также по формуле (7), в которой количество элементов ряда принимали $m=50$. Абсолютную разность значений температуры $|\Delta t|=t_{m=50}-t_{m=2 \div 6}$, полученных при $m=2 \div 6$ и $m=50$, использовали для анализа применимости различного количества элементов ряда в формуле (7). На рис. 3 приведены границы применимости уравнения (7) при использовании в нем $m=2 \div 6$. Зона применимости уравнения (7) для определенного значения m ограничена погрешностью $|\Delta t|=0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Для наглядности на рис. 3 приведены значения теплофизических характеристик некоторых хорошо известных материалов. Из рисунка видно, что для того, чтобы разность в по-

казаниях температуры в буферном слое, определенная экспериментально и расчетным путем с помощью формулы (7), составила менее $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, количество элементов ряда в формуле (7) должно быть, например, для воды не менее трех, а для водного льда - не менее пяти.

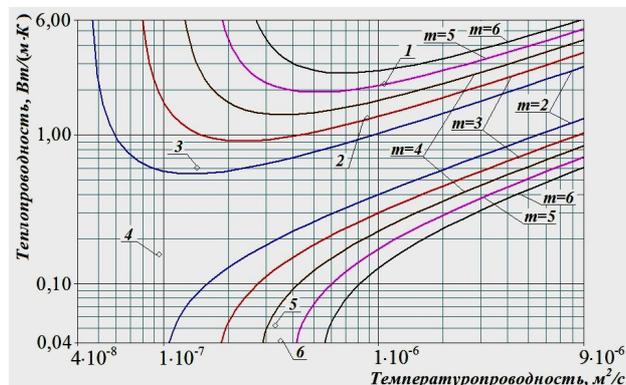


Рис. 3. Необходимое количество элементов ряда в системе уравнений (8) в зависимости от теплофизических свойств исследуемого материала для теплоприемника, выполненного из оргстекла при толщине буферного слоя $h_B=5 \text{ мм}$, толщине слоя исследуемого материала $R=5 \text{ мм}$; $m=2 \div 6$ - количество элементов ряда в системе уравнений (8). Для наглядности на рисунке приведены значения теплофизических характеристик: 1 - лед водный; 2 - стекло кварцевое; 3 - вода при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 - резина твердая; 5 - пенопласт ПИХВ-1; 6 - пенополиуретан

Использование в уравнениях (7), (8) большого количества элементов ряда m нецелесообразно. Это не повысит точности определения теплофизических характеристик, только усложнит расчетные формулы и соответственно увеличит погрешности при численном решении системы уравнений (8). Для того чтобы адекватно описать изменение температуры в буферном слое при исследовании материалов, обладающих высокими теплопроводящими свойствами (металлов), количество элементов ряда m должно быть >40 . Достаточно проблематично решить систему таких уравнений численно, кроме того, условия проведения эксперимента для получения опытной зависимости изменения температуры в буферном слое должны быть практически идеальными. Это свидетельствует о непригодности метода двух температурно-временных интервалов для определения теплофизических характеристик материалов, обладающих высокими теплопроводящими свойствами.

Определение теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов возможно, если толщина исследуемого материала будет значительно меньше диаметра теплоприемника, а теплоизоляция теплоприемника и измерительной ячейки будет выполнена из материала, обладающего лучшими теплоизоляционными свойствами.

Для определения теплофизических характеристик материалов первым буферным методом двух

температурно-временных интервалов предлагается следующая методика.

Принципиальная схема лабораторной установки, предназначенной для экспериментального определения теплофизических характеристик первым буферным методом двух температурно-временных интервалов, изображена на рис. 4. Она состоит из теплоприемника 1, который изготовлен из оргстекла, его боковая поверхность покрыта пенополиуретановой теплоизоляцией 13. Нагреватель, размещенный в корпусе 5, обладающий малой тепловой инерционностью, выполнен из медной проволоки 7. Он позволяет поддерживать постоянную температуру с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ с помощью термостатирующего устройства, чувствительным элементом которого является тиристор 9. Основание нагревателя 6, основание теплоприемника 14, фиксирующие винты 19, винтовое приспособление 18 способны перемещаться по направляющим стержням 16, которые установлены в основании установки 17. Они обеспечивают доступ к исследуемому объекту 4 и необходимый тепловой контакт между поверхностями объекта, теплоприемником и нагревателем. Измерение температур в ходе теплотехнического эксперимента производится хромель-копелевыми термоэлектрическими преобразователями (термопарами), одна из которых 10 размещена на рабочей поверхности нагревателя 8, другая 2 - в буферном слое теплоприемника, третья 15 - на свободной поверхности теплоприемника. Расстояние между рабочей поверхностью теплоприемника и термопарой 2 называют буферным слоем 3. Толщина буферного слоя должна быть значительно меньше высоты теплоприемника H ($H \gg h_B$, в нашей установке $h_B = 5$ мм, $H = 200$ мм).

Исследуемый материал размещается в полости 4 между теплоприемником и нагревателем. Нагреватель, теплоприемник и объект исследования до опыта должны находиться в тепловом равновесии. При включении нагревателя происходит интенсивный разогрев его рабочей поверхности до заданной температуры. Теплота от нагревателя через исследуемый материал передается теплоприемнику, температура которого повышается.

Для проверки применимости предлагаемой методики производились определения теплофизических характеристик дистиллированной воды. Верхнее расположение нагревателя в установке исключает конвективные потоки в измерительной полости. Результатом теплотехнического эксперимента являются термограммы (рис. 5) - температурная зависимость от времени для нагревателя (линия 1) t_n , для разности температур между буферным слоем и рабочей поверхностью нагревателя (линия 2) ($t_n - t$), для свободной поверхности теплоприемника (линия 3).

Таким образом, экспериментально определив зависимость изменения температуры буферного слоя от времени, можно решить уравнение (7), определив неизвестные коэффициенты λ , a , если известны постоянные теплоприемника a_B , b .

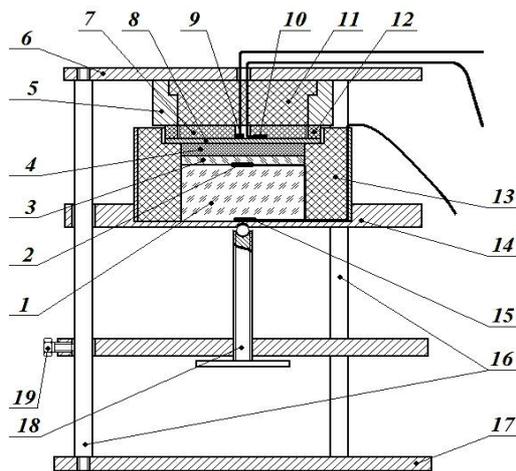


Рис. 4. Схема лабораторного стенда для определения теплофизических характеристик первым буферным методом двух температурно-временных интервалов

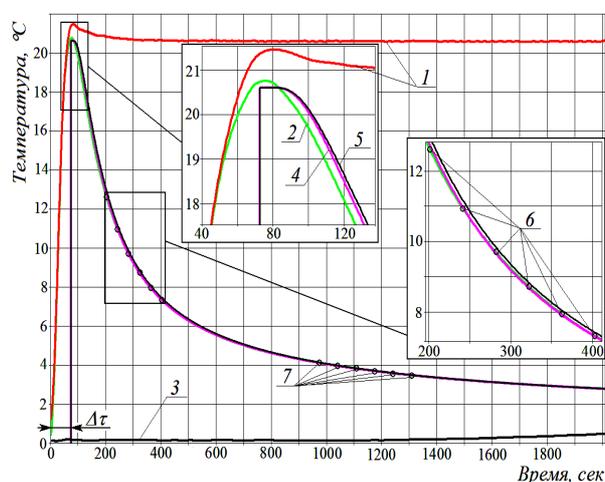


Рис. 5. Результаты теплотехнического эксперимента (термограммы) определения теплофизических характеристик дистиллированной воды первым буферным методом двух температурно-временных интервалов

Моменты времени τ_1 и τ_2 первого и второго временных интервалов следует выбирать достаточно удаленными друг от друга. Момент времени первого временного интервала (τ_1) должен находиться в начале зоны регулярного режима. Момент времени второго временного интервала (τ_2) необходимо выбирать в зоне температурной стабильности свободной поверхности теплоприемника. Для того чтобы повысить точность определения теплофизических характеристик, исключить влияние случайных погрешностей измерения температуры в буферном слое при выборе моментов времени (τ_1) и (τ_2), целесообразно использовать не единичные точки, а группы точек (поз. 6, 7, рис. 5). Для каждой пары точек составляется система уравнений (8), из которых находятся значения теплофизических характеристик для каждой пары точек. Для получения окончательного результата можно взять средние значения полученных множеств коэффициентов

теплопроводности и температуропроводности. Поскольку нагреватель обладает некоторой тепловой инерционностью и для выхода его на стационарный температурный режим требуется некоторое время, необходимо учесть время разогрева нагревателя ($\Delta\tau$). При подстановке в систему уравнений моментов времени τ_1 и τ_2 величина $\Delta\tau$ отнимается от значений τ_1 и τ_2 .

Значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности воды, определенные в эксперименте с помощью приведенной методики, составили $\lambda=0,602 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $a=1,509 \text{ м}^2/\text{с}$. С учетом полученных величин и с помощью уравнения (7) построена зависимость разности температур между нагревателем и буферным слоем от времени (линия 4, рис. 5). Справочные величины коэффициентов теплопроводности и температуропроводности воды составляют соответственно $\lambda=0,597 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $a=1,43 \text{ м}^2/\text{с}$.

С помощью уравнения (7) и справочных значений теплопроводности и температуропроводности воды получена зависимость разности температур между нагревателем и буферным слоем от времени (линия 5, рис. 5).

Как видно из рис. 5, линии 2, 4 и 5 достаточно близки. Заметные отличия их значений наблюдаются только в зоне максимальных разностей температур. На остальных участках кривые практически сливаются.

Для получения достоверных результатов необходимо обеспечить хороший тепловой контакт между поверхностями нагревателя и исследуемым объектом, между исследуемым объектом и теплоприемником. Для улучшения теплового контакта допускается использование специальных термопаст.

Таким образом, первый буферный метод двух температурно-временных интервалов позволяет определять теплофизические характеристики с достаточно высокой степенью точности. Этот метод является комплексным и скоростным, дает высокую воспроизводимость полученных результатов. Точность определения значений теплофизических характеристик можно повысить, если использовать более точные средства измерения температуры и менее инерционные нагреватели. Лабораторная установка компактна и изготовлена из доступных материалов, а предлагаемая методика позволяет максимально автоматизировать процесс определения теплофизических характеристик

Список литературы

1. Богданов С.Н., Иванов О.П., Куприянова А.В., Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник. - М.: Агропромиздат, 1985. - 208 с.
2. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические свойства пищевых продуктов. - М.: Агропромиздат, 1990. - 287 с.
3. Волькенштейн В.С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов. - Л.: Издательство «Энергия», 1971. - 145 с.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М., Энергия, 1975.
5. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. Ч. 1.- М.: Высш. школа, 1982. - 327 с.

ГОУ ВПО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности»,
650056, г. Кемерово, 6-й Строителей, 47

SUMMARY

I.A. Korotkiy

Application of the method of two temperature-time intervals to a definition of thermophysical characteristic of solidlake, liquid and loose materials

The methods of two temperature-time interval allow to define thermophysical characteristic with a high degree of accuracy. They are universal for thermophysical researches of various groups of materials. These methods are complex and high-speed.

The article contains theoretical bases of the first buffer method of two temperature-time intervals and description of a technique of its practical realization for experimental definition the thermophysical characteristics of solidlake, liquid and loose materials.

Termophysical characteristics, thermal conductivity, temperature conductivity, thermic capacity, the method of two temperature-time intervals.

