

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА**

*В настоящее время тепловизионная диагностика в энергетике использует методы пассивного теплового контроля. Актуальным является развитие методов активного теплового контроля на работающем оборудовании с помощью тепловизора. При этом тепловизионная техника становится незаменимым инструментом для анализа переходных тепловых процессов, распространения тепловых волн на действующем высоковольтном оборудовании. В работе рассмотрены вопросы определения физического параметра — температуропроводности, — характеризующего скорость распространения теплового фронта или волны в объеме электроизоляционного материала. Рассмотрены процессы распространения теплового потока в режимах постоянной мощности и температуры. Представленная методика показывает непосредственно в процессе эксплуатации возможности тепловизионной диагностики в активном тепловом режиме для измерения теплофизических параметров электроизоляционных материалов, а также изделий на их основе.*

### **Постановка задачи**

Методы неразрушающего контроля с применением тепловизионной техники используются при диагностике электро- и теплоэнергетического оборудования непосредственно в процессе эксплуатации [1].

---

Тепловизионная диагностика как метод теплового контроля использует методы теплового вида. Пассивный контроль в общем случае предназначен для контроля теплового режима объектов контроля; для обнаружения отклонений от заданной формы и геометрических размеров объектов контроля. При активном контроле, в отличие от пассивного, объект подвергают воздействию от внешнего источника энергии. Активный контроль, в свою очередь, предназначен для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности в объектах контроля (трещины, пористости, расслоение, инородные включения); для обнаружения изменений в структуре и физико-химических свойствах объектов контроля (неоднородность структуры, теплопроводность структуры, теплоемкость и коэффициент излучения).

В настоящее время в энергетике главным образом используется пассивный тепловой контроль, в процессе которого происходит регистрация тепловых полей на поверхности объектов, разогреваемых в процессе эксплуатации за счет диэлектрических потерь или теплопередачи. Подобный подход к тепловизионным испытаниям сужает возможности развивающейся тепловизионной диагностики в энергетике.

Расширение круга научно-практических задач, в частности, в энергетике, связано с актуальностью развития методов активного теплового контроля на работающем оборудовании, например, при коммутационных процессах и т.п. При этом тепловизионная техника становится незаменимым инструментом для анализа переходных тепловых процессов, распространения тепловых волн на действующем высоковольтном оборудовании.

В связи с этим особую актуальность приобретают исследования теплофизических параметров электроизоляционных материалов, ответственных за нестационарные тепловые процессы. Прежде всего, это относится к *температуропроводности*  $a$  — к физическому параметру, который, в отличие от коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , характеризует скорость распространения теплового фронта или волны в объеме материала.

Коэффициент температуропроводности  $a$  является основным теплофизическим параметром для описания процессов теплопроводности при неустановившемся во времени режиме и теоретически определяется по соотношению

$$a = \lambda / c \cdot \rho_m, \quad (1)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость тела;  $\rho_m$  — плотность материала.

Значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  различных — главным образом электропроводящих — материалов широко известны и приводятся в различных справочных материалах. Сведения о коэффициенте температуропроводности реальных электроизоляционных материалов, применяемых в устройствах энергетики, крайне ограничены, что прежде всего связано со сложностями определения данного параметра [2–5]. Методы экспериментального определения коэффициента температуропроводности  $a$  основаны главным образом на применении термопарных измерителей температуры в отдельных точках материала.

Применение тепловизионных приемников с широким обзором температурного поля поверхности материала, хранением и обработкой значений температуры во многих сечениях, визуализацией процесса распространения теплового потока в материалах или изделиях, в том числе с внутренними дефектами, открывает новые возможности для научного анализа теплофизических параметров материалов и для практического применения тепловизионной диагностики.

При анализе возможностей тепловизионной техники для определения коэффициента температуропроводности  $a$  нами выбран полимерный материал — полиметилметакрилат (ПММК) — оргстекло, по нескольким причинам. Электрофизические параметры ПММК относительно постоянны:  $\lambda = 0,185$  Вт/м·К;  $c = 1,62$  кДж/м<sup>3</sup>;  $a = 1,06 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с [6]. Данный электроизоляционный материал широко применяется в реальных высоковольтных установках, применяемых в электроэнергетике, для которых тепловизионный метод диагностики технического состояния под рабочим напряжением в ряде случаев является единственным.

Для испытаний был выбран образец (1) ПММК в форме удлиненного параллелепипеда с длиной 26 см размерами сечения 3,2х5,2 см<sup>2</sup>. Различные тепловые режимы моделировались установкой плоского нагревательного элемента (3) на переднем торце образца (рис. 1).

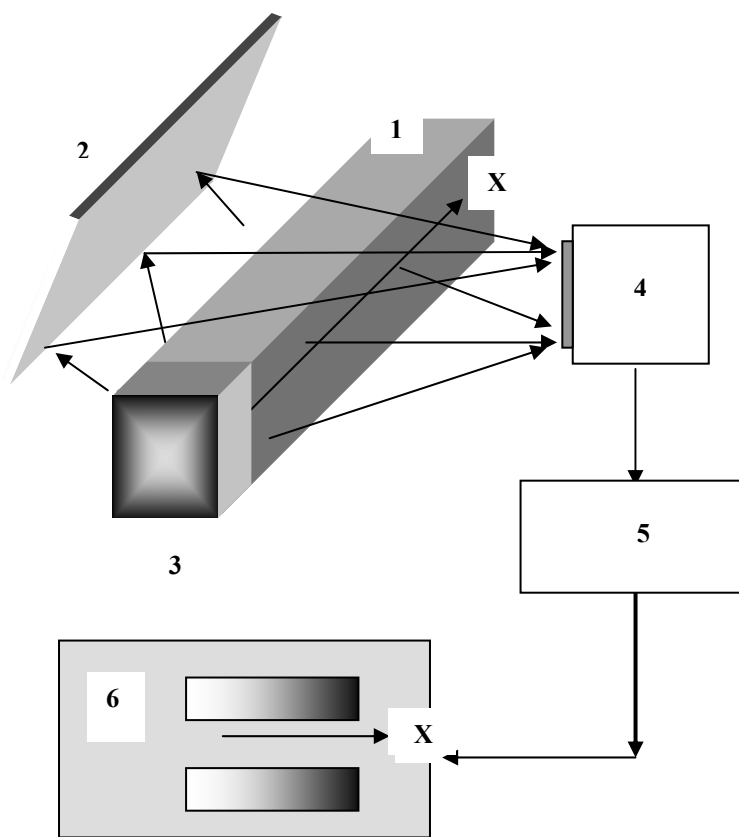


Рис. 1. Общая схема измерения

В процессе распространения теплового потока  $q$  в объеме материала от переднего к противоположному торцу (вдоль оси  $X$ ) происходило непрерывное наблюдение за температурным полем поверхности с помощью тепловизора АГА-782 (4), сохранение и обработка информации на ЭВМ (5). Методика позволяет производить расчет температуры в любой точке поверхности с помощью цветной или черно-белой термограмм в серых тонах (6).

Целью работы является повышение точности и чувствительности методов тепловых измерений и расширение класса исследуемых объектов при измерениях коэффициентов теплопроводности и температуропроводности.

Для детализации оценки анизотропных свойств материала или образца, фиксации неоднородности распространения теплового потока в различных направлениях предусмотрено [6] применение зеркального отражателя излучения (2), с помощью которого можно следить за изменением температуры задней поверхности объекта. Подобный способ позволяет оценить влияние анизотропии тепловых свойств на параметры образца (изделия).

### Режим постоянной мощности

В теплофизических измерениях находят применение главным образом задачи, в которых источник создает внутри образца одномерное температурное поле. С точки зрения теории теплопроводности, рассматриваемые задачи относятся к классу задач с граничными условиями второго рода. Данный режим характерен, например, для объектов энергетики, разогреваемых от электрических устройств с фиксированными значениями тока и мощности.

Рассмотрим особенности режима постоянной мощности, характеризующегося постоянным тепловым потоком, входящим в объект. Допустим, что на передней поверхности плоского полупространства с равномерным температурным полем с момента времени  $\tau = 0$  действует тепловой источник с постоянной удельной плотностью  $q_n$  (рис.1).

В общем случае решение задачи постоянного потока на плоском полупространстве описывается следующими выражениями [2]:

$$t(x, \tau) = T(x, t) - T_0 = \frac{q_n}{\lambda} \int_x^{\infty} \operatorname{erfc}(u) dx = \frac{2q_n}{\lambda} \sqrt{a\tau} \cdot \operatorname{ierfc}(u); \quad (2)$$

$$q(x, \tau) = q \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right); \quad (3)$$

$$u = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}; \quad (4)$$

$$\operatorname{ierfc}u = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) - u(1 - \operatorname{erfc}u); \quad (5)$$

$$\operatorname{ierfc}u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-u^2) du, \quad (6)$$

где  $T(x, \tau)$  — распределение температуры в зависимости от координаты  $X$  и времени  $\tau$ ,  $T_0$  — температура среды и стенки в нулевой момент времени.

Для удобства анализа в теплофизических задачах используется значение относительной избыточной температуры  $\Theta$ , определяемое по соотношению:

$$\Theta = [T(x, \tau) - T(x, 0)] / [T(0, \infty) - T(x, 0)] = t(x, \tau) / t(0, \tau), \quad (7)$$

где  $T(x, 0)$ ,  $T(x, \infty)$  — значения температуры в точке с координатами  $X$  и  $X = 0$  (на нагреваемой грани) в произвольный момент времени.

Для описания теплообмена тел одинаковой формы используют числа подобия, в частности, число Фурье, определяемое как

$$F_o = a\tau/x^2, \quad (8)$$

где  $X$  — определяющий размер тела, например, половина толщины пластины, радиус цилиндра, шара;  $\tau$  — время.

С учетом формулы (4) имеем:

$$F_0 = u^2/4. \quad (9)$$

В процессе теплофизических измерений с помощью тепловизора может быть реализовано несколько схем опыта.

При контроле температуры передней грани непосредственно регистрируемым (диагностическим) параметром является температура поверхностного слоя, которая может быть рассчитана из формулы (2) по соотношению

$$t(x, \tau) = T(x, t) - T_0 = \frac{2q_n}{\lambda} \sqrt{a\tau / \pi}. \quad (10)$$

Если же в опыте регистрируется температура двух слоев, например, поверхностного слоя и слоя с  $X = X_0$ , то общее решение уравнения дает возможность рассчитать коэффициенты теплопроводности и температуропроводности с использованием неявных функций:

$$t(x_0, \tau) / t(0, \tau) = 2\sqrt{\pi} \cdot \operatorname{ierf} \left[ \frac{1}{2\sqrt{F_0}} \right]. \quad (11)$$

Со временем тепловой поток с определенной скоростью распространяется от нагреваемого торца, и температура в каждом сечении образца возрастает. По экспериментальным данным тепловизионного контроля была построена зависимость распределения температуры в теле от координаты (рис. 2).

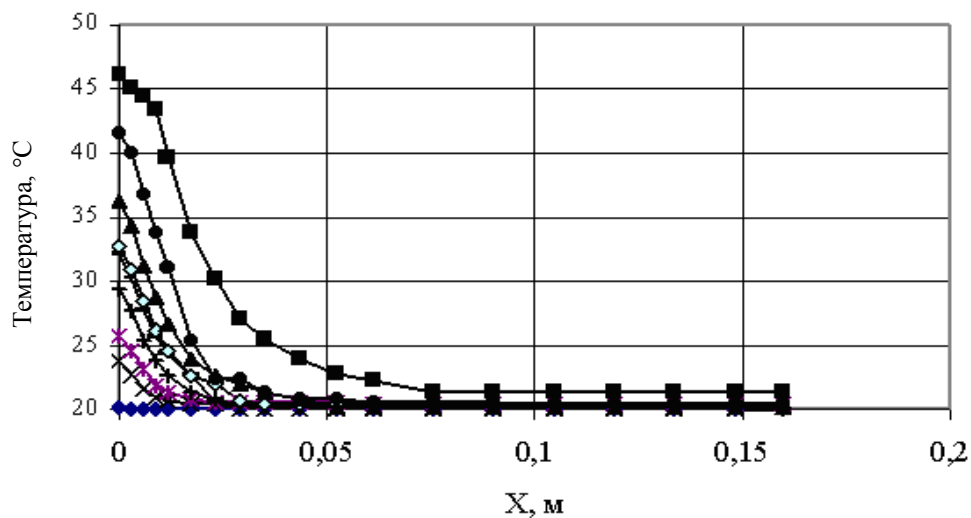


Рис. 2. Зависимость распределения температуры в различных сечениях от координаты (разное время)

Из соотношения (10) следует, что в режиме постоянной мощности квадрат приращения температуры  $t(x, \tau)$  пропорционален времени  $\tau$ . Данный режим проявляется в диапазоне времени 500...2500 с после протекания первоначального переходного процесса (рис. 3).

Задавая фиксированные значения  $X$  на поверхности образца, можно экспериментально определить изменение температуры со временем (рис. 4), и по

этим данным рассчитать значение относительной избыточной температуры  $\Theta$  (рис. 5) с помощью соотношения (7).

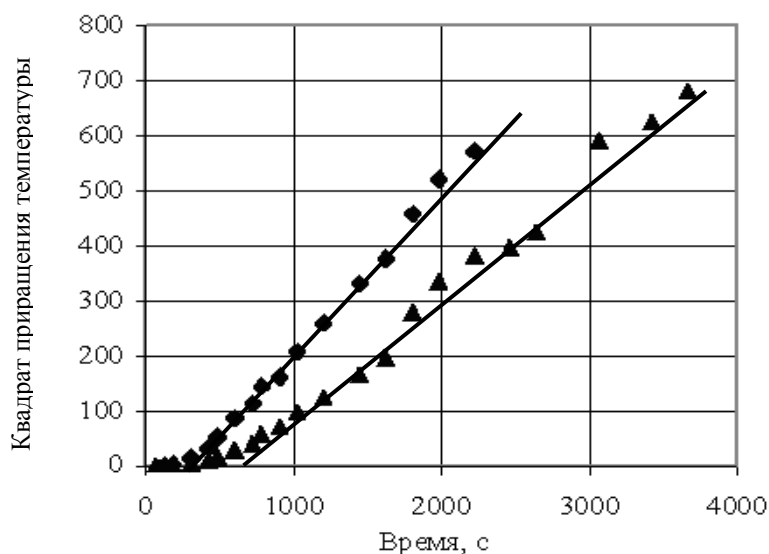


Рис. 3. Зависимость квадрата приращения температуры от времени для различных сечений: 1 –  $X=0$ ; 3 –  $X=6$  мм

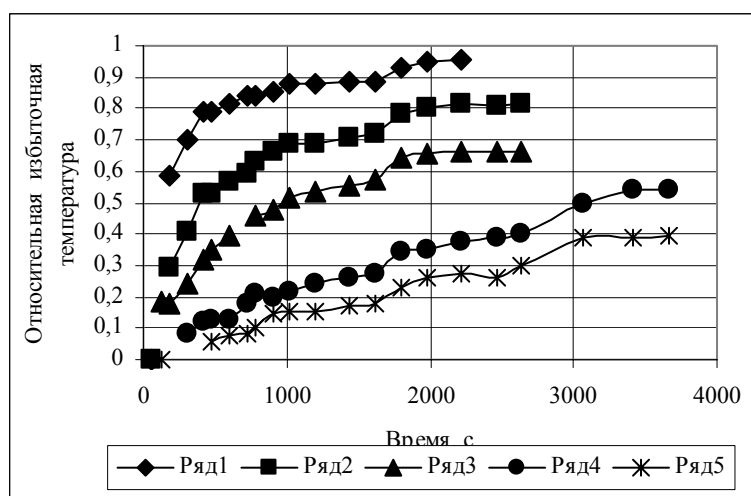


Рис. 4. Значение относительной избыточной температуры  $\Theta$  в различных сечениях материала.  $X$ , см: 1 — 3; 2 — 6; 3 — 9; 4 — 17; 5 — 23

Зависимость относительной избыточной температуры  $\Theta$  от числа Фурье рассчитана нами по соотношениям (2)–(7) и в графическом виде представлена на рис. 5.

Значение коэффициента температуропроводности  $a$  может быть рассчитано по алгоритму, представленному на рис. 6. По экспериментальным данным при произвольном  $X_i$  находим значение относительной избыточной температуры  $\Theta$  по соотношению (7), после чего с учетом зависимости  $ierfc(u_i)$  (рис. 6) рассчитываем величины  $Fo_i$  и  $u_i$ .

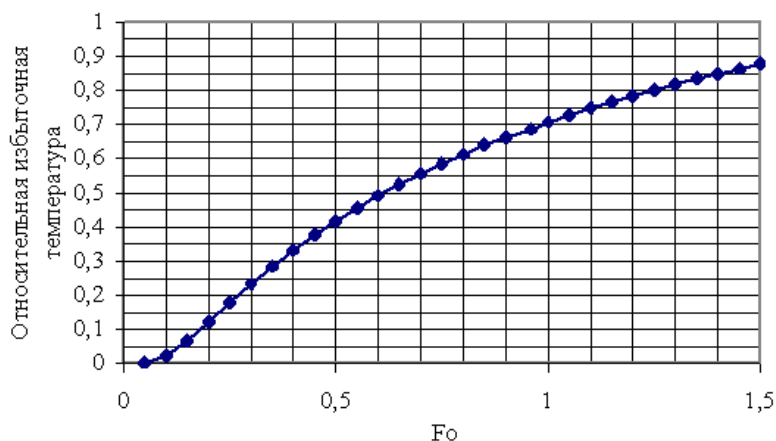


Рис. 5. Зависимость относительной избыточной температуры  $\Theta$  от  $F_0$

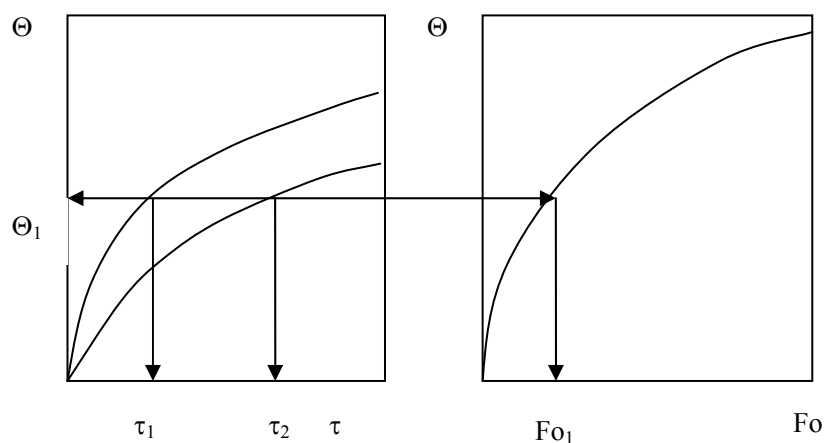


Рис. 6. Порядок расчета коэффициента  $a$  в режиме постоянного потока

Например, в сечении при  $X = 2,3$  см в момент времени 1200 с значение относительной избыточной температуры  $\Theta = 0,15$ . При этом значении  $\Theta$  с учетом зависимости  $\text{ierfc}(u_i)$  получаем  $F_0 = 0,22$  и, следовательно:  $a_i = 0,97 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Выбирая произвольные значения координаты сечения образца и время, можно рассчитать среднее значение коэффициента температуропроводности по совокупности данных: расчеты показывают, что  $a_{\text{cp}} = 1,05 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

### Режим постоянной температуры

Режим постоянной температуры реализуется при фиксированной температуре на передней грани образца. Рассмотрим задачу плоского одномерного полупространства. Данная задача реализуется в том случае, когда образец имеет форму полуограниченного плоского тела с теплоизолированной боковой поверхностью. В общем случае решение задачи постоянной температуры  $T_n$  на плоском полупространстве имеет вид [2]

$$t(x, \tau) = T(x, t) - T_0 = t_n \cdot \text{erfc}(u) ; \quad (12)$$

$$\operatorname{erfc}u = \frac{2}{\pi} \cdot \int_u^{\infty} \exp(-u^2) du, \quad (13)$$

где  $t_n = T_n - T_0$ .

Плотности тепловых потоков в произвольном сечении  $X_i$  и на поверхности образца ( $X=0$ ) могут быть рассчитаны по соотношениям

$$q(x, \tau) = t_n \cdot \left( \frac{\sqrt{\lambda c \rho}}{\sqrt{\pi \tau}} \right) \cdot \exp[-x^2 / 4a\tau]; \quad (14)$$

$$q(x, \tau) = t_n \cdot \left( \frac{\sqrt{\lambda c \rho}}{\sqrt{\pi \tau}} \right). \quad (15)$$

На рис. 7 приведены экспериментальные данные для образца ПММК, полученные при реализации режима постоянной температуры на передней грани образца. Экспериментальное значение температуры  $T_n$  находится в пределах  $(46,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ .

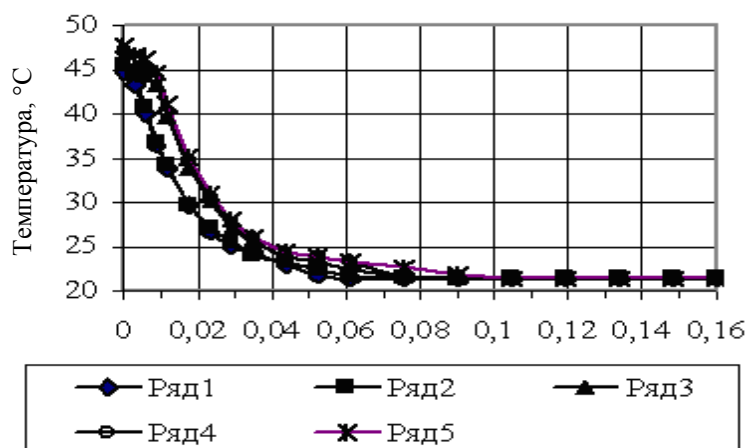


Рис. 7. Распределение температуры по длине образца при изотермическом режиме. Время, с: 1...2460; 2...2640; 3...3060; 4...3420; 5... 3660

Температура в различных сечениях образца зависит от координаты и времени испытаний. На основании экспериментальных данных можно рассчитать значения приведенной температуры  $\Theta$  для произвольной координаты  $X_i$ . Для примера на рис. 8 приведены значения  $\Theta$  для момента времени  $\tau = 3420$  с в различных сечениях образца.

В том случае, когда измерение температуры проводится в различных слоях  $X_i$ , значение коэффициента теплопроводности  $a$  может быть рассчитано по алгоритму, представленному на рис. 9.

По экспериментальным данным при заданном  $X_i$  находят значение относительной избыточной температуры  $\Theta(x_i, \tau)$  по соотношению:

$$\Theta(x_i, \tau) = t(x_i, \tau) / t_n, \quad (16)$$

после чего с учетом соотношения (12) имеем

$$\Theta(x_i, \tau) = t(x_i, \tau) / t_n = \operatorname{erfc}(u_i) \quad (17)$$

и окончательно рассчитываем величину  $u_i$  по данным функции  $\operatorname{erfc}(u_i)$ .



Величина коэффициента температуропроводности  $a_i$  определяется по соотношению

$$a = x_i^2 / (2u_i \cdot \tau_i)^2 \quad (18)$$

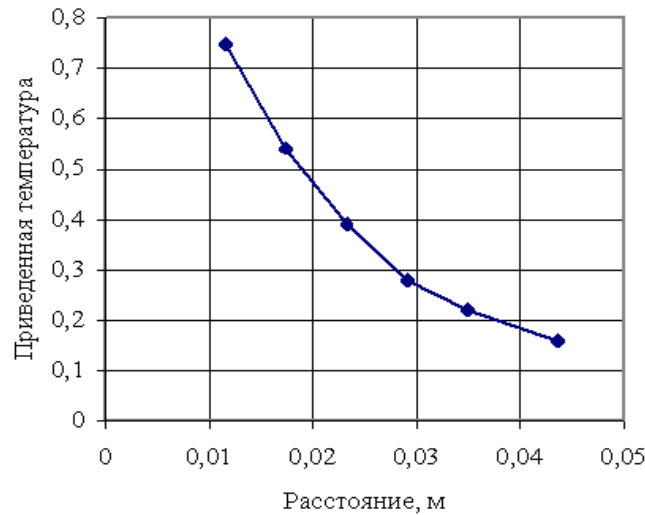


Рис. 8. Относительная избыточная температура  $\Theta$  в различных сечениях образца ( $\tau = 3420$  с)

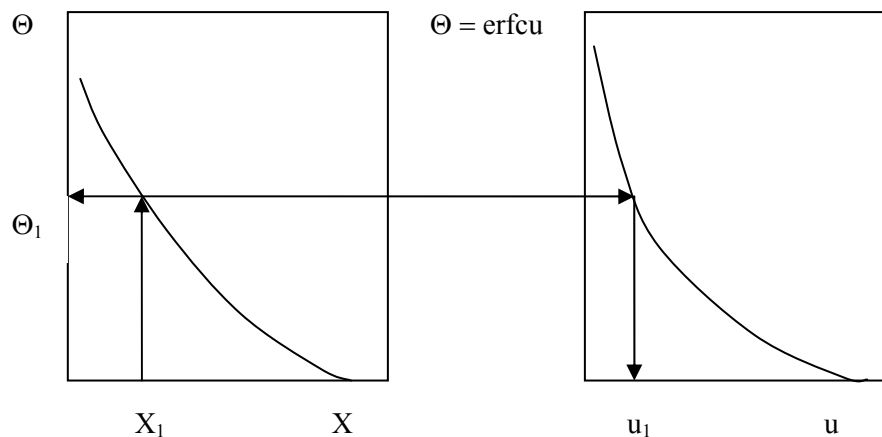


Рис. 9. Порядок расчета коэффициента температуропроводности в режиме постоянной температуры

На рис. 10 представлены рассчитанные значения функции  $\text{erfc}(u)$ , с помощью которой определялись соответствующие значения  $u(x_i)$ .

Например, для  $X = 0,0175$  м получено экспериментальное значение величины  $\Theta = 0,541$ , что соответствует значению  $u = 0,44$ . Окончательный расчет по соотношению (18) дает  $a_i = 1,15 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

После проведения расчетов для нескольких сечений и различных времен испытаний нами получено среднее значение коэффициента температуропроводности  $a_{\text{ср}} = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  при среднем квадратичном отклонении, равном  $\sigma_a = 0,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

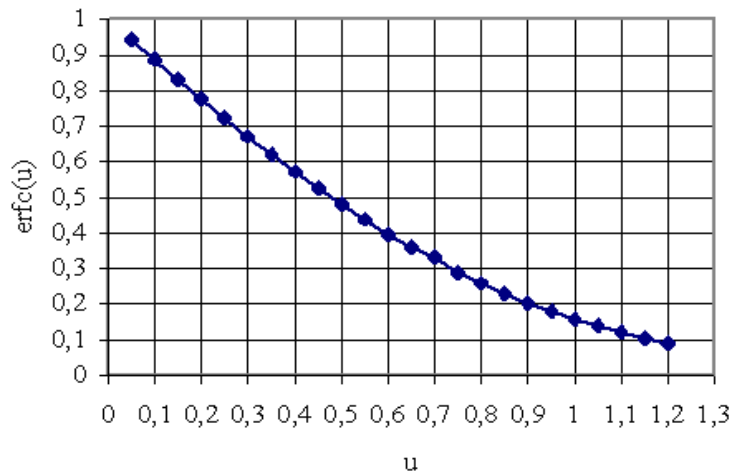


Рис. 10. Расчетные значения функции  $\text{erfc}(u)$

Представленная методика показывает возможности тепловизионной диагностики в активном тепловом режиме для измерения теплофизических параметров электроизоляционных материалов, а также изделий на их основе, непосредственно в процессе эксплуатации.

Полученные данные позволяют оценить скорость распространения теплового потока через электроизоляционные материалы, характеризующиеся малыми значениями коэффициента температуропроводности, а также время протекания переходных процессов в аппаратах

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Власов А. Б. Обработка и анализ данных тепловизионного контроля электрооборудования // Электротехника. 2002. № 7. 37–43.
2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., 1967.
3. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / Под ред. А. В. Лыкова. М., 1973.
4. Теплофизические измерения и приборы / Под общ. ред. Е. С. Платунова. Л., 1986.
5. Мищенко С. В., Карпов А. М., Чуриков А. А., Пономарев С. В., Андреев Е. Ф. Способ определения теплофизических характеристик материалов. АС SU 1689825 А1, G 01 N 25/18. 30.03.89. Бюл. № 41 от 07.11.91.

A. Vlasov

#### STUDY OF THE FACTOR OF THERMAL CONDUCTIVITY OF ELECTRICAL INSULATION MATERIALS BY MEANS OF THERMOVISION

*At present termovision diagnostics uses the methods of passive heat checking. It seems reasonable to develop the methods of active heat checking on working equipment by means of termovision. Termovision technology is becoming an irreplaceable instrument for analysis of transitional heat processes spreading the heat waves on the acting high-tension equipment. The paper considers questions of the determination of a physical parameter — thermal conductivity (thermometric conductivity, thermal diffusivity) which characterizes the velocity of heat front or wave spreading within the volume of electrical insulation material. The processes of heat flow spreading the in modes of constant power and temperature are considered. The presented method shows that termovision diagnostics in active heat mode can be used for the measurement of parameters of insulation materials as well as product made of them.*