

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ИЗЛУЧАТЕЛЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ТЕПЛОВИЗОРОВ

**В.А. Кораблёв, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики.**

**Д.А. Минкин, кандидат технических наук.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.**

**А.В. Шарков, доктор технических наук, профессор.
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики**

Предложена конструкция устройства для калибровки инфракрасных приборов, рассмотрены особенности свободно-конвективного теплообмена на вертикальной поверхности, предложен метод формирования изотермических условий.

Ключевые слова: изотермическая поверхность, свободно-конвективный теплообмен, калибровка, тепловизор

PROVIDING OF ISOTHERMAL CONDITIONS OF CALIBRATING DEVICE EMITTER FOR THERMOVISION CAMERA

V.A. Korablev. Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics.

D.A. Minkin. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia.

A.V. Sharkov. Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

Construction of calibrating device for thermovision camera is suggested, peculiarities of free convection near the vertical plate are described, method of providing isothermal conditions is suggested.

Keywords: isothermal surface, free convection, calibration, thermovision camera

Тепловизионная техника появилась в прошлом веке, но использовалась главным образом для военных целей, сегодня же она имеет обширную область применения, в том числе при обнаружении и ликвидации пожаров.

Тепловизоры позволяют вести противопожарный мониторинг лесных массивов и торфяников, дают возможность пожарным и спасателям работать в условиях недостаточной видимости и задымленности, удаленно оценивать обстановку, определять направления и эвакуации.

В связи с высокой ответственностью проводимых работ с помощью тепловизоров важное значение имеет точность их показаний, от которой зависит успех выполнения поставленных задач. Калибровка позволяет установить соответствие между показаниями измерительного прибора и значением физической величины. Она позволяет оценить неопределенность полученного результата.

Целью данной работы является расчет параметров излучателя в устройстве для калибровки тепловизоров. Требования к устройству определяются совокупностью параметров, которые заданы в ГОСТ Р 8.619–2006 ГСИ «Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки». Одним из требований является обеспечение высокой изотермичности ($\pm 0,07$ К при перегреве над температурой среды 10 К) вертикальной

пластины-излучателя, которая находится в свободно-конвективном и лучистом теплообмене с окружающей средой.

Экспериментальные исследования нагретых плоских вертикальных поверхностей, находящихся в условиях свободно конвективного теплообмена с окружающей средой, показывают, что градиент температуры по их поверхности достигает значений $0,1 \frac{K}{см}$ и более [1].

Такое распределение температуры зависит от ряда факторов, среди них: расположение и мощность источников тепловыделений, значения локального коэффициента теплоотдачи на границе объект-среда, теплопроводность материала объекта. Для формирования требуемого распределения температуры необходимо определять соответствующие значения подводимого и отводимого локальных тепловых потоков, подбирать материалы и геометрию самого объекта.

В настоящей работе рассмотрен метод формирования требуемого температурного поля вертикальной пластины. Суть метода заключается в особом распределении плотности тепловыделений в пластине, поскольку свободное движение воздуха вблизи ее поверхности приводит к неравномерному распределению интенсивности теплообмена по высоте.

Для расчета распределения плотности тепловыделений необходимо знать распределение интенсивности отводимого теплового потока. Рассмотрим свободное гравитационное течение около вертикальной нагретой пластины.

Изотермичная пластина находится в воздушной среде, ее температура выше температуры окружающего воздуха. При этом около пластины возникает подъемное движение нагретого слоя воздуха. Вдали от пластины скорость воздуха равна нулю. Процесс стационарный.

В такой постановке задача свободноконвективного теплообмена на вертикальной нагретой поверхности решалась многими авторами. Из проведенного обзора источников по данной тематике выберем несколько расчетных формул. Среди них:

1) Исаченко В.П. [2]:

$$Nu_x \equiv 0.473 \sqrt[4]{(Gr_x Pr)}. \quad (1)$$

2) Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А [3]:

$$Nu_x = 0,6 \left(\frac{Pr}{1 + 2 Pr^{\frac{1}{2}} + 2 Pr} \right)^{\frac{1}{4}} Ra_x^{\frac{1}{4}}. \quad (2)$$

3) Дульнев Г.Н. [4]:

$$Nu_x = 0,508 Pr^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Gr_x}{0,952 + Pr} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (3)$$

4) John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V [5]:

$$Nu_x = 0,508 Ra_x^{\frac{1}{4}} \left(\frac{Pr}{0,952 + Pr} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (4)$$

5) Соковишин Ю.А., Мартыненко О.Т. [6, 7]:

$$Nu_x = \frac{1}{2} Pr^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{3}{\sqrt{2}} - 1 \right) + (\sqrt{2} + 1) Pr \right]^{\frac{1}{4}} Gr^{\frac{1}{4}}; \quad (5)$$

$$Nu_x = 0.453 (Pr + 0.453)^{\frac{1}{4}} Pr^{\frac{1}{2}} Gr^{\frac{1}{4}}. \quad (6)$$

6) Себиси Т., Бредшоу П. [8]:

$$Nu_x = \frac{3}{4} \left(\frac{2 Pr}{5 \left(1 + 2 Pr^{\frac{1}{2}} + 2 Pr \right)} \right)^{\frac{1}{4}} Ra_x^{\frac{1}{4}}. \quad (7)$$

В качестве примера на рис. 1 приведено распределение коэффициента теплоотдачи по высоте пластины по формулам (1–7) в условиях свободной конвекции при перегреве пластины над температурой окружающей воздушной среды $\vartheta_c = 10$ К.

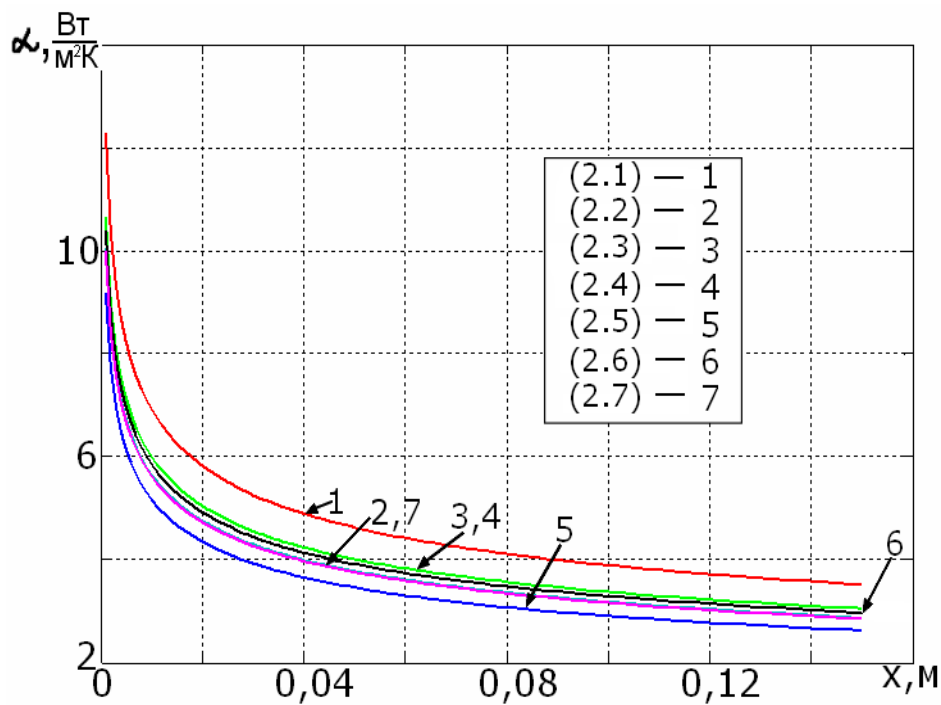


Рис. 1. Распределение конвективного коэффициента теплоотдачи по высоте пластины (номера указаны кривые, соответствующие формулам (1–7) соответственно; на рис. перекрываются кривые 3 и 4, 2 и 7)

Для расчетов будем пользоваться решением (6) из [7] – кривая 6 на рис. 1. Видно, что коэффициент теплоотдачи вдоль вертикальной пластины существенно неравномерный. На пластине высотой 0,15 м происходит его изменение более чем в три раза. В результате, в случае равномерного подведения теплового потока низ пластины оказывается холоднее верха.

Для формирования требуемого температурного поля пластины предлагается метод расчета и выбора параметров, который позволяет соответствующее изменение

интенсивности конвективного теплообмена по высоте пластины компенсировать переменной локальной плотностью подводимого теплового потока.

Для расчета необходимого распределения плотности подводимого теплового потока $q_s(x)$ составим дифференциальное уравнение пластины при следующих условиях: тепловой поток с поверхности рассеивается в окружающую среду (воздух) конвекцией и излучением; теплоотдачей с торцов пренебрегаем; начало координат - нижняя кромка пластины, процесс стационарный:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{\alpha_{кл}(x)\Pi(T - T_c)}{\lambda\delta L_2} + \frac{q_s(x)}{\lambda\delta} = 0. \quad (8)$$

Предлагаемый метод позволяет обеспечивать температурные поля различного вида. В качестве примера приводится случай обеспечения изотермических условий, как наиболее часто встречающихся при решении практических задач. В этом случае уравнение (8) решается с учетом того, что $\frac{d^2T}{dx^2} = 0$. Тогда выражение для плотности теплового потока примет вид:

$$q_s(x) = \frac{\alpha_{кл}(x)\Pi(T - T_c)}{L_2}.$$

Вычисление конвективной составляющей теплообмена проводится из (6), а лучистой из [9]:

$$\alpha_{л} = \varepsilon \cdot 5.67 \frac{\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_c}{100}\right)^4}{t - t_c}. \quad (9)$$

Расчеты показали, что обеспечение равномерного температурного поля пластины возможно при создании на ее поверхности распределения плотности теплового потока, показанного на рис. 2.

На рис. 2 приведен результат расчета распределения плотности подводимого теплового потока для случая, когда необходимо обеспечить равномерное температурное поле на пластине высотой 0,15 м, имеющей температуру 30 °С при температуре окружающей воздушной среды 20 С.

Для подтверждения достоверности предложенного метода формирования температурного поля изготовлена экспериментальная установка. Ее основу представляет собой вертикальная пластина, изготовленная из высокотеплопроводного материала – меди. В качестве средства для реализации требуемого распределения плотности подводимого теплового потока предлагается использовать проволочный нагреватель, уложенный витками на тыльной поверхности пластины. При этом переменные значения плотности подводимого теплового потока обеспечить за счет переменного шага расположения витков. Для обеспечения изотермических условий в нижней части пластины витки укладывать более часто, где требуется большая плотность, а в верхней более редко, то есть с большим шагом. Так непрерывное распределение плотности теплового потока $q_s(x)$ заменяется дискретными источниками теплоты, на рис. 2 они обозначены ✱.

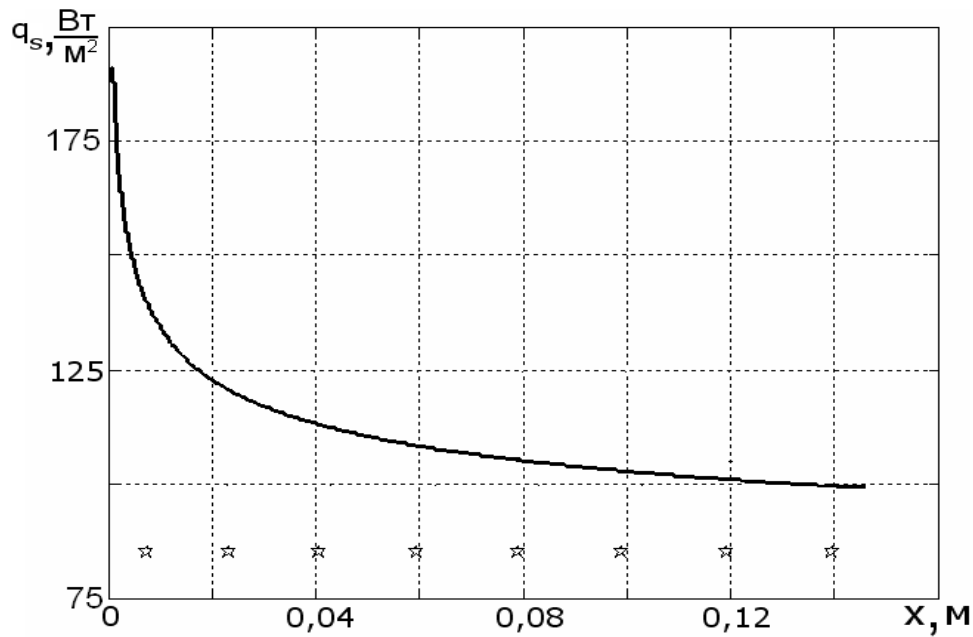


Рис. 2. Результат расчета распределения плотности теплового потока,
 * – витки нагревателя

Длина провода нагревателя выбирается, исходя из общей максимальной тепловой мощности и используемого электрического напряжения. С учетом длины провода и ширины пластины можно определить необходимое число канавок и мощность тепловыделений нагревателя, расположенного в одной канавке.

Шаг расположения витков нагревателя можно определить по результатам интегрирования плотности теплового потока по поверхности пластины с учетом соотношений для коэффициентов конвективного и лучистого теплообмена, а так же значений мощности тепловыделений в одной канавке:

$$\Phi_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} L_2 \alpha_{кл}(x) (T - T_c) dx, \quad (10)$$

где x_i, x_{i+1} – шаги интегрирования по высоте пластины.

Соотношение (10) справедливо при условии, что пластина изотермична и перетока теплоты из одной секции в другую не происходит. Уравнение (10) решается относительно x_{i+1} , а x_i определяется из предыдущего шага интегрирования, которое осуществляется от нижней кромки пластины при $x_i=0$.

Оценка шага нагревателя по формуле (10) носит приближенный характер, так как в ней не учитывается толщина пластины, которая существенно влияет на изотермичность пластины. Для данной оценки рассмотрено температурное поле секции пластины с одним витком нагревателя, занимающим область в виде полосы [9]. Размеры секции L_1 и L_2 , толщина δ , ширина полосы $2r$, координаты ее центра ε (рис. 3).

Считается, что теплообмен открытых поверхностей полосы с окружающей средой отсутствует. Пренебрегая рассеиванием энергии с торцов пластины, приходим к температурному полю, изменяющемуся в направлении оси x . Будем рассматривать температурное поле отдельно для верхней и нижней частей по отношению к полосе.

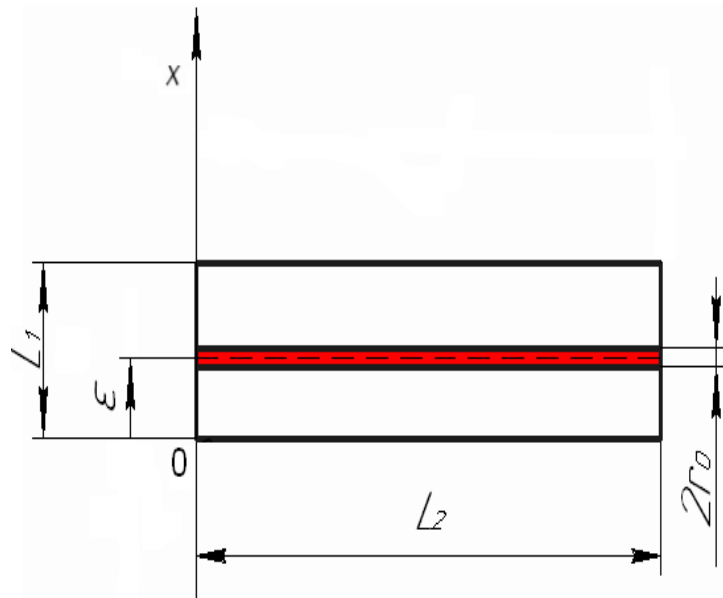


Рис. 3. Секция пластины с одним витком нагревателя

Для каждой из частей i справедливо дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 \vartheta_i}{dx^2} - b^2 \vartheta_i = 0; \quad \vartheta_i = t_i - t_c; \quad b^2 = \frac{\alpha(x)}{\lambda \delta}$$

при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} -\delta L_2 \lambda \frac{d\vartheta_\varepsilon}{dx} \Big|_{x=\varepsilon+r} = P_\varepsilon; \\ -\delta L_2 \lambda \frac{d\vartheta_\varepsilon}{dx} \Big|_{x=\varepsilon-r} = P_\varepsilon; \\ \frac{d\vartheta_\varepsilon}{dx} \Big|_{x=L_1} = \frac{d\vartheta_\varepsilon}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \end{cases},$$

где P_ε и P_ε – тепловые потоки, поступающие в нижнюю и верхнюю части секции пластины.

Пользуясь решением данной системы уравнений [9], можно оценить минимальную толщину пластины, достаточную для обеспечения равномерности температурного поля заданной точности.

Предварительная оценка эффективности такого способа реализации предложенного метода формирования температурного поля проводилась на основе численного моделирования теплообмена на примере вертикальной пластины, изготовленной из меди. В программном пакете Comsol multiphysics задавалась его геометрия, расположение витков нагревателя в соответствии с результатами расчетов по формуле (10), распределение конвективно-лучистого теплообмена по высоте из формул (6) и (9). На рис. 4 представлено распределение температуры по поверхности пластины при перегреве над температурой среды 10 К. Видно, что предложенный метод формирования температурного поля значительно повышает изотермичность пластины.



Рис. 4. Распределение температуры по поверхности вертикальной медной пластины толщиной 1 мм

Кроме того, проводилась экспериментальная оценка распределения температуры по высоте пластины с помощью тепловизора марки Flir P65, его чувствительность составляет $\pm 0,08$ К. Для повышения точности тепловизионных измерений на лицевую поверхность пластины было нанесено покрытие с заранее известным коэффициентом излучения $\varepsilon = 0,95$.

На рис. 5 представлено схематическое изображение пластины с канавками для нагревателя, выполненными с переменным шагом. Тыльная сторона с нагревателем закрывалась слоем теплоизоляции.

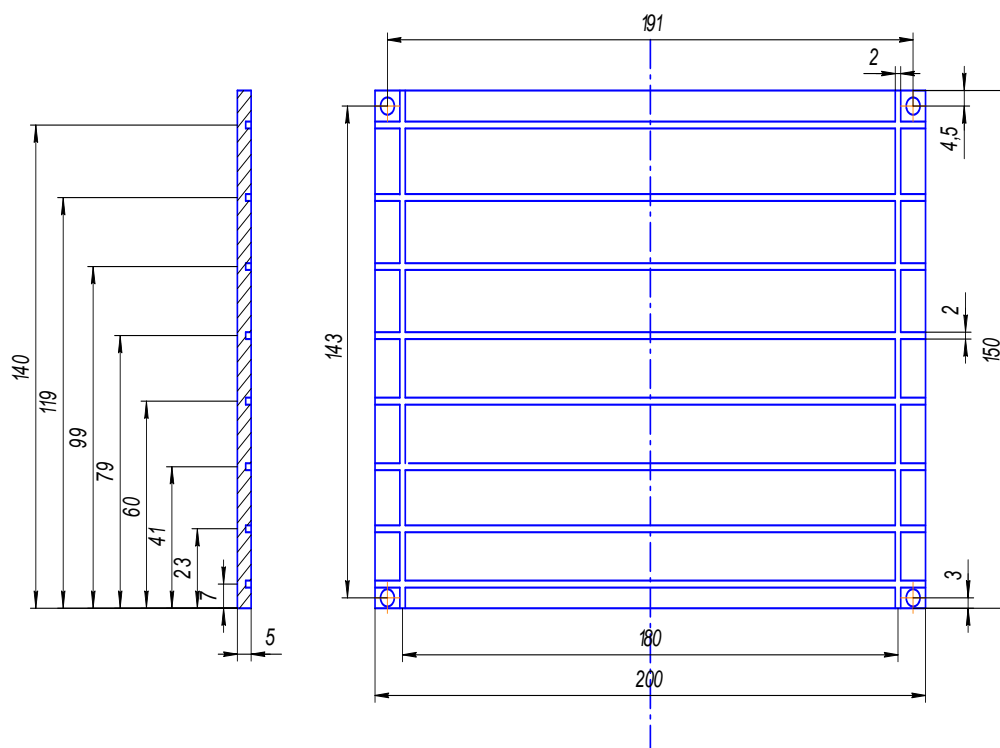


Рис. 5. Пластина с канавками для нагревателя, выполненными с переменным шагом

В процессе эксперимента на нагреватель подавалось электрическое напряжение от источника постоянного тока. После выхода экспериментальной установки

на стационарный режим проводились тепловизионные измерения. В качестве примера на рис. 6 представлена термограмма пластины при перегреве над температурой среды 5 К.

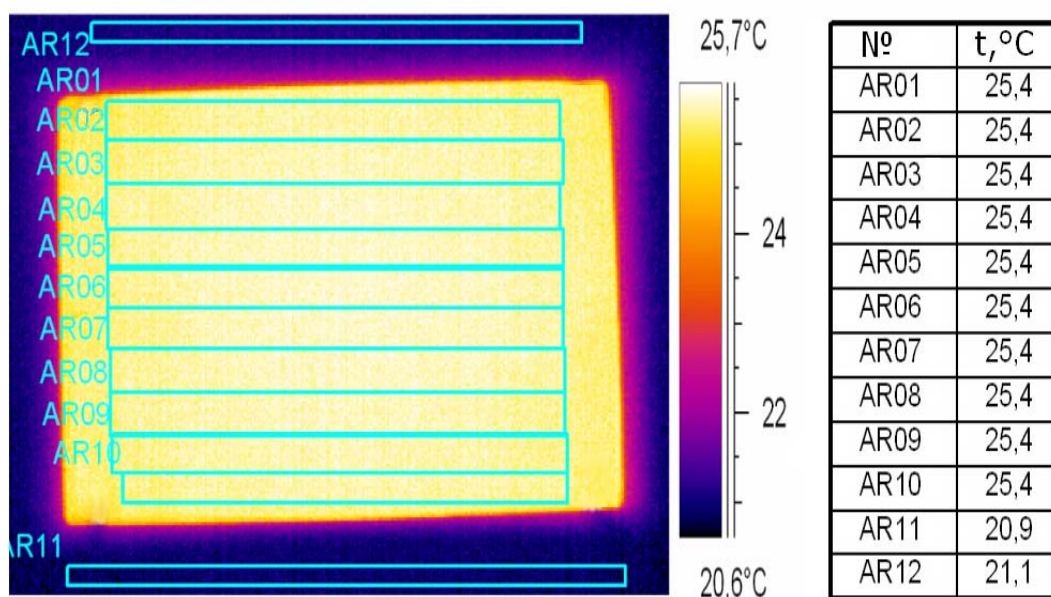


Рис. 6. Результат тепловизионной съемки нагретой пластины на фоне, имеющем температуру окружающей среды:
AR01–AR10 участки пластины, в которых измеряется температура;
AR11, AR12 – участки фона

Полученные результаты съемки показали высокую изотермичность пластины (не хуже $\pm 0,07$). Неравномерность ее температурного поля не превысила уровень шумов матрицы тепловизора, что позволяет рекомендовать предложенный метод формирования температурного режима для практического применения.

Предложенный метод формирования температурного поля реализован в устройстве для калибровки тепловизоров, максимальное время выхода устройства на заданный температурный режим не превышает пяти минут, регулирование разности температур пластин от 0,1 до 10 К осуществляется с погрешностью не более $\pm 0,03$ К. Экспериментальное исследование излучающих поверхностей размером 0,15x0,2 м показало их высокую изотермичность (не хуже $\pm 0,07$ К, что составляет $\pm 0,7$ % от заданного уровня). Внешний вид устройства представлен на рис. 7.



Рис. 7. Комплект оборудования для калибровки тепловизора

Литература

1. Никоненко В.А., Сильд Ю.А., Иванов И.А. Разработка системы метрологического обеспечения измерительных тепловизионных приборов. Измерительная техника. 2004. № 4. С. 48–51.
2. Теплопередача: учеб. / В.П. Исаченко [и др.]. 4-е изд., перераб и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
3. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А., Тепломассообмен: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. М.: МЭИ, 2005. 550 с.
4. Дульнев Г.Н. Механика жидкостей и газов: учеб. пособие. СПб.: С.-Петербург. гос. ин-т точн. мех. и опт. (техн. ун-т), 2001. 188 с.
5. A heat transfer textbook / John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V. 3-rd ed. Cambridge, MA: Phlogiston press, 2008.
6. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен на вертикальной поверхности (граничные условия второго рода). М.: Наука и техника, 1977. 216 с.
7. Соковишин Ю.А., Мартыненко О.Г. Введение в теорию свободно-конвективного теплообмена. Л.: ЛГУ, 1982. 224 с.
8. Себиси Т., Бредшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы: пер. с англ. М.: Мир, 1987. 592 с.
9. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 359 с.