

2. **Аверин И. А., Волохов И. В., Мокров Е. А., Печерская Р. М.** Влияние переходных процессов в тонкоплёночной гетерогенной структуре на надёжность чувствительных элементов тензорезисторных датчиков давления // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2008. № 2. С. 123—127.
3. **Лугин А. Н.** Влияние термомеханических воздействий на температурную и временную стабильность сопротивления прецизионных тонкоплёночных резисторов // Электронная промышленность. 1995. № 1. С. 57—60.
4. **Розенблат М. А.** Микротроника — новое направление развития датчиков и исполнительных устройств // Приборы и системы управления. 1996. № 12. С. 49—57.
5. **Тихоненков В. А., Мишин В. А., Тихонов А. И.** Технология производства металлоплёночных датчиков механических величин. Учебное пособие для вузов. Ульяновск: Ульяновский гос. техн. ун-т, 2003.
6. **Корляков А. В.** Ростовые фазовые политипные превращения при эпитаксии карбида кремния и нитрида алюминия: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛЭТИ, 1989.

7. **Гурин С. А., Печерская Р. М.** Особенности технологии получения структуры «нитрид алюминия на карбиде кремния» для чувствительного элемента // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 1. С. 46—53.
8. **Мокров Е. А., Белозубов Е. М., Тихомиров Д. В.** Минимизация погрешности тонкоплёночных тензорезисторных датчиков давления при воздействии нестационарной температуры // Датчики и системы. 2004. № 1. С. 26—29.
9. **Пат. 1615578 РФ.** Датчик давления / Е.М. Белозубов // Изобретения. 1994. № 17.
10. **Мокров Е. А., Волохов И. В., Герасимов О. Н., Крысин Ю. М.** Проектирование датчиков на основе тонкоплёночных технологий: Учебное пособие. Пенза: Информ.-изд. центр Пензенского гос. ун-та, 2007. С. 79.
11. **Волохов И. В.** Технологические методики повышения стабильности параметров тонкоплёночных тензорезисторных датчиков давления: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Пенза, 2008.

Дата принятия 25.02.2015 г.

535.233:53.088.23

Влияние погрешностей задания внешних рабочих параметров на точность измерения температуры инфракрасными приборами

Е. В. ЛЕВИН, А. Ю. ОКУНЕВ

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия, e-mail: aqwsrv@list.ru

Приведены параметрические погрешности измерений температуры инфракрасными приборами, возникающие из-за неточности задания внешних параметров — коэффициентов излучения объекта и пропускания воздуха, температур воздуха и фонового отражённого излучения. На примерах рабочих диапазонов длин волн 8,0—14,0 мкм и 1,0—1,6 мкм показана зависимость погрешности измерения от внешних параметров и измеряемой температуры.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, температура отражённого излучения, коэффициенты излучения и пропускания.

The parametric errors data for temperature measurement with IR instruments due to inaccuracy of external parameters assignments is presented. These parameters are: emissivity, air transmission coefficient, temperature of reflected radiation, air temperature. By the examples for operating wavelength ranges 8,0—14,0 and 1,0—1,6 μm are shown the dependence of error of measurement of the external parameters and the measured temperature.

Key words: infrared radiation, temperature of reflected radiation, emissivity, air transmission coefficient.

В [1] показана связь между погрешностью измерения температуры инфракрасным (ИК) прибором и вызывающей её неточностью задания внешних параметров — интегральных в рабочем диапазоне длин волн коэффициентов излучения обследуемого объекта и пропускания воздуха, температур отражённого излучения и воздуха. Результаты получены на основе анализа энергетического баланса на приемнике

излучения ИК-прибора. Показано, что погрешность измерения температуры зависит не только от погрешностей задания указанных параметров, но также и от значений самих параметров, рабочего диапазона длин волн $\Delta\lambda$ ИК-прибора и измеряемой температуры.

В настоящей работе, с целью иллюстрации полученных в [1] результатов, приведена подборка расчётных данных на

примере двух типов ИК-приборов, принципиально отличающихся по спектральным диапазонам: длинноволновых приборов с $\Delta\lambda_1 = 8,0 \dots 14,0$ мкм, предназначенных для измерений сравнительно низких температур порядка сотен кельвинов; коротковолновых приборов с $\Delta\lambda_2 = 1,0 \dots 1,6$ мкм, применяемых для измерений температур до нескольких тысяч кельвинов.

Основным соотношением между относительными погрешностями задания параметров и измерения абсолютной температуры T_x является

$$\frac{\delta T_x}{T_x} = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\delta T_{x_i}}{T_{x_i}} \right) \approx \Phi_\varepsilon \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} + \Phi_o \frac{\delta T_o}{T_o} + \Phi_\tau \frac{\delta \tau}{\tau} + \Phi_B \frac{\delta T_B}{T_B}, \quad (1)$$

где ε , τ — интегральные коэффициенты излучения объекта и пропускания воздуха; T_o , T_B — абсолютные температуры отражённого излучения и воздуха; Φ — коэффициенты, зависящие от указанных выше параметров, рабочего спектрального диапазона $\Delta\lambda$, а также от измеряемой температуры [1]; $\Delta_i = (\delta T_{x_i}/T_{x_i})_i$ — локальные параметрические составляющие относительной погрешности измерений.

Соотношение (1) записано в линейном приближении как полный дифференциал уравнения энергетического баланса и его высокая точность достигается при сравнительно небольших (в пределах 10—15 %) относительных погрешностях $\delta X/X$ задания внешних параметров. Однако это не означает, что приведённые далее результаты потеряют смысл и значимость при более высоких погрешностях. Как минимум, их можно будет использовать как оценочные, показывающие общие тенденции влияния погрешностей задания внешних параметров.

Рассмотрим, каким образом значения параметров и относительные погрешности их задания влияют на Δ_i . В основу анализа положим точные расчеты коэффициентов Φ с использованием уравнения Планка для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела (АЧТ). Для удобства используем две температурные шкалы: абсолютная температура T в кельвинах, для которой записано соотношение (1) и вычисляются относительные погрешности измерений Δ_i , и более привычная, с точки зрения практики, температура $t = T - 273,15$ °C — ей соответствуют иллюстративные материалы.

Влияние погрешности задания коэффициента излучения. В разных точках объекта интегральный коэффициент излучения ε может иметь различные значения. Причинами этого являются как геометрические факторы (выступы, углубления и др.), так и состояние поверхности (присутствие в структуре объекта материалов с разными коэффициентами излучения, пленок, загрязнений, шероховатостей различной степени и т. д.) [2—4]. Для поверхности сложной формы существенное влияние на ε может оказывать угол наблюдения каждой точ-

ки. Поэтому, используя при измерениях некоторое заранее известное базовое табличное значение коэффициента излучения ε_0 , практически всегда имеем ту или иную погрешность задания для обследуемого объекта в целом или отдельных участков поверхности. Даже в идеальных условиях (однородная плоская поверхность, известно точное значение ε_0) минимальная относительная погрешность ε составляет 0,5 %, что для современных ИК-приборов определяется минимальным дискретным шагом $\Delta\varepsilon_{\min} = \pm 0,01$, задаваемым оператором. В реальных условиях относительная погрешность задания ε может достигать 10 % и более.

Покажем основные закономерности влияния погрешности задания ε на относительную локальную параметрическую погрешность измерения температуры, используя точные вычисления коэффициента Φ_ε :

$$|\Delta_1| = \left| \left(\delta T_x / T_x \right)_1 \right| = \left| (\delta \varepsilon / \varepsilon) \Phi_\varepsilon \right|. \quad (2)$$

Из [1] известно, что значение Φ_ε зависит только от температур обследуемой поверхности и отраженного излучения. Для определенности используем интервал температуры отраженного излучения $t_o = -50 \dots +80$ °C, относящийся к реальным значениям при тепловизионных обследованиях, например, строительных объектов. Нижняя граница может соответствовать температуре излучения от чистого неба при ночной тепловизионной съемке, а верхняя — излучению от некоторых нагретых объектов: отопительных приборов, электротехнических устройств и др. В дополнение (чтобы проследить тенденции) в расчётах рассмотрена температура $t_o = 0$ °C.

На рис. 1, а приведены зависимости коэффициента Φ_ε от температур t_x , t_o . Как следует из графиков, $|\Phi_\varepsilon| > 1$ и, следовательно, высокая параметрическая относительная погрешность $|\Delta_1|$ наблюдается только при $t_o > t_x$. Для рассматриваемых температур t_o абсолютное значение коэффициента $|\Phi_\varepsilon|$ может превысить единицу для диапазона $\Delta\lambda_1$ только в области отрицательных измеряемых температур, а для $\Delta\lambda_2$ также и в области положительных температур.

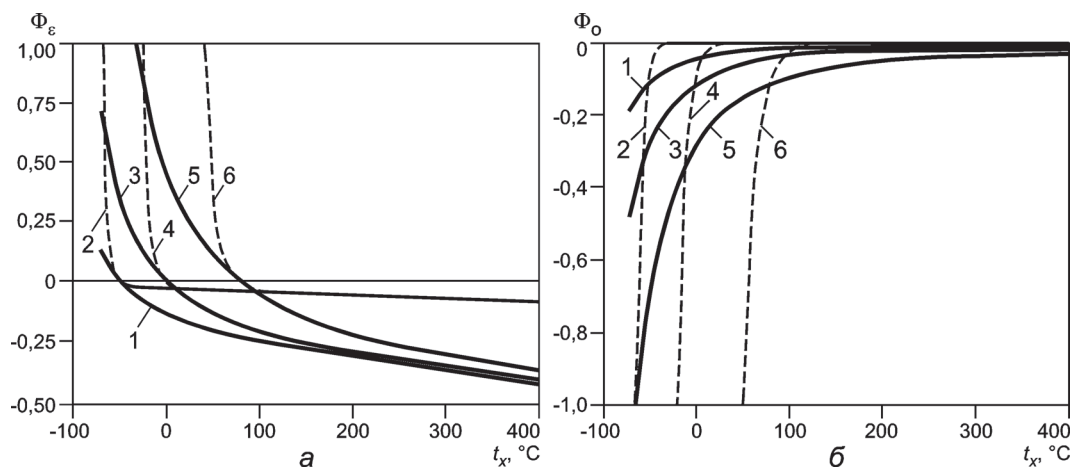


Рис. 1. Зависимость коэффициентов Φ_ε (а) и Φ_o (б) от измеряемой температуры t_x для разных спектральных диапазонов: $\Delta\lambda_1 = 8,0 \dots 14,0$ мкм (кривые 1, 3, 5) и $\Delta\lambda_2 = 1,0 \dots 1,6$ мкм (кривые 2, 4, 6) при $t_o = -50$; 0; $+80$ °C — соответственно кривые 1, 2; 3, 4 и 5, 6

Если $t_0 < t_x$, то практически всегда $|\Phi_\epsilon| < 1$ и параметрическая относительная погрешность измерений (см. (2)) меньше относительной погрешности задания ϵ . На графиках рис. 1, а показано, что с увеличением t_x значение коэффициента Φ_ϵ для каждого рассматриваемого спектрального рабочего диапазона приближается к предельным зависимостям, приведенным в [1], которые позволяют оценивать верхнюю границу $|\Delta_1|$. Расчеты показали, что для $t_0 \leq 80^\circ\text{C}$ в диапазоне $\Delta\lambda_1$ при $t_x > 25^\circ\text{C}$ верхнюю границу погрешности (2) можно вычислить как

$$|\Delta_1| \leq (0,24 + 3,6 \cdot 10^{-4} t_x) |\delta\epsilon/\epsilon|, \quad (3)$$

а в диапазоне $\Delta\lambda_2$ при $t_x > 70^\circ\text{C}$

$$|\Delta_1| \leq (0,03 + 9,0 \cdot 10^{-5} t_x) |\delta\epsilon/\epsilon|. \quad (4)$$

Если $t_x \approx t_0$, то коэффициент $|\Phi_\epsilon|$ становится малым и погрешность задания ϵ не оказывает заметного влияния на $|\Delta_1|$. В этом случае практически без потери точности измерений в ИК-приборе оператор может выбрать любое значение коэффициента ϵ , например $\epsilon=1$. На практике при тепловизионной съемке крупномасштабных объектов, когда в кадре фиксируется неоднородное температурное поле, условие $t_x \approx t_0$ в среднем может оказаться справедливым для всего кадра, а на отдельных участках не выполняться, и тогда для детализации температурного поля при математической обработке кадра потребуется уточнить распределение коэффициента ϵ .

Из приведенных данных можно сделать два общих вывода. Во-первых, для сравнительно большого диапазона измеряемых температур погрешность $|\Delta_1| < |\delta\epsilon/\epsilon|$, а $|\Delta_1| > |\delta\epsilon/\epsilon|$ только если t_0 заметно превышает t_x . Во-вторых, по сравнению с длинноволновыми приборами, коротковолновые, предназначенные для измерений высоких температур, оказываются менее чувствительными к точности задания ϵ . Влияние погрешности задания ϵ у коротковолновых приборов существенно, когда обследуемый объект подвергается облучению от источника с очень высокой температурой, что на практике иногда можно избежать за счет экранирования и других способов.

Зависимости (3), (4) можно применять для оценки верхней границы локальной параметрической относительной погрешности измерений температуры для многих измерительных ИК-приборов. Например, для приборов, работающих в диапазоне 3—5 мкм, при достаточно больших температурах поверхности объекта относительная погрешность будет находиться между значениями, рассчитанными по (3), (4).

Влияние погрешности задания температуры отраженного излучения. Температура T_0 в основном является самым сложным для определения параметром, входящим в уравнение энергетического баланса. Это связано с тем, что отраженное излучение формируется из совокупного фонового излучения от нескольких объектов, имеющих различную температуру, известную, в свою очередь, только приблизительно. Наиболее ярко это проявляется у измеряемого объекта, имеющего поверхность с диффузным отражением, принимающую и рассеивающую фоновое излучение во всех направлениях, включая объектив ИК-прибора. Для опера-

тивных оценок температуры T_0 на практике используют методику, по которой на измеряемую поверхность наклеивают маркер с высоким коэффициентом отражения. Однако для поверхности с диффузным отражением при этом возможны погрешности, обусловленные тем, что в силу «зеркальности» принятого от маркера излучения, последнее часто получается не от всех формирующих его источников. В качестве основного источника отраженного излучения часто принимают небо, земную поверхность или другие крупномасштабные объекты, проводя для них оценочные измерения радиационной температуры тем же ИК-прибором, задавая $\epsilon=1$. При этом не всегда учитывают другие имеющиеся источники и, следовательно, погрешность $\delta T_0/T_0$ задания температуры может составить от нескольких до десятков процентов. Выполнение работ в закрытых помещениях иногда позволяет проводить оценочные измерения и вычисления или просто полагают $T_0 = T_{\text{в}}$.

Коэффициент Φ_0 как и Φ_ϵ зависит от температур обследуемой поверхности и отраженного излучения, но наибольший вклад в погрешность вносит зависимость от коэффициента излучения в виде сомножителя $(1 - \epsilon)/\epsilon$. [1]. Используем те же температуры $t_0 = -50; 0; +80^\circ\text{C}$, примем $\epsilon=0,9$, что соответствует большому ряду обследуемых объектов (строительные материалы и др.).

На рис. 1, б приведены зависимости коэффициента Φ_0 от измеряемой температуры t_x при выбранных значениях t_0 . Из графиков следует, что абсолютная локальная параметрическая относительная погрешность измерений температуры

$$|\Delta_2| = \left| (\delta T_x / T_x)_2 \right| = \left| (\delta T_0 / T_0) \Phi_0 \right| \quad (5)$$

при возрастании t_x относительно t_0 стремится к нулю. Для $\Phi_0 \approx 0$ оператор может выбрать произвольно температуру t_0 , например, воспользоваться собственными субъективными оценками или просто задать температуру воздуха. В особенности это проявляется для коротковолнового диапазона $\Delta\lambda_2$ (кривые 2, 4, 6), где, начиная с $t_x \geq 150^\circ\text{C}$ (фактически во всем температурном рабочем диапазоне прибора), погрешность задания t_0 практически не влияет на точность измерений. Для диапазона $\Delta\lambda_1$ это справедливо при $t_x \geq 250^\circ\text{C}$.

При $t_x < t_0$ относительная погрешность измерений (5) возрастает и может значительно превысить относительную погрешность $\delta T_0/T_0$. Для спектрального диапазона $\Delta\lambda_1$ это наблюдается в области отрицательных измеряемых температур, а для $\Delta\lambda_2$ — также и в области положительных температур хотя они в рассмотренных примерах настолько низкие, что не входят в рабочий температурный диапазон прибора. Следует добавить, что с уменьшением коэффициента излучения ($\epsilon < 0,9$) погрешность измерений $|\Delta_2|$ будет возрастать по закону $(1 - \epsilon)/\epsilon$ и соответственно увеличатся требования к точности задания t_0 при заданной точности измерений t_x .

В тех случаях, когда $t_x \approx t_0$, в уравнении энергетического баланса в силу его структуры исчезает зависимость от ϵ , но это не означает, что также исчезнет погрешность измерений, которая стремится к

$$\Delta_2 = (\delta T_0 / T_0) (1 - \epsilon)/\epsilon. \quad (6)$$

Значение Δ_2 при сравнительно малых ϵ может составить значительную величину. Подобные ситуации встречаются на

практике. Например, необходимо измерить температуру холодного объекта (намного ниже температуры воздуха), рядом с которым находится подобный объект и излучение от его поверхности попадает на обследуемый объект. Оператор может не принять во внимание подобный объект и в качестве температуры отражённого излучения ошибочно задаст температуру воздуха. В результате возникает довольно большая параметрическая относительная погрешность задания температуры T_0 и соответствующая ей погрешность измерений (5).

В качестве иллюстрации требований к погрешности задания T_0 рассмотрим пример, основанный на данных рис. 1, б для диапазона $\Delta\lambda_1$. Пусть измерения проводятся для трёх объектов, первый из которых имеет температуру $t_x = -25^\circ\text{C}$, второй — 0°C , третий — 25°C . Положим $t_b = 0^\circ\text{C}$, $t_0 = -50^\circ\text{C}$ (источник отраженного излучения — ночное безоблачное небо). Температуру необходимо измерить с погрешностью $|\Delta_2| = 0,005$, что соответствует $(\delta t_x)_2 = \pm 1,24; \pm 1,36; \pm 1,49^\circ\text{C}$. В этом случае (см. кривую 1 для $t_0 = -50^\circ\text{C}$) допустимая относительная погрешность задания температуры отражённого излучения при измерении каждого объекта должна соответственно составить $|\delta T_0/T_0| = 7,6; 11,4; 16,1\%$ или в единицах температуры $\pm 18,8; \pm 28,2; \pm 40^\circ\text{C}$. Если оператор в качестве температуры отражённого излучения по какой-либо причине примет температуру воздуха, равную 0°C , то $|\delta T_0/T_0| = 20\%$ и требуемая погрешность $|\Delta_2| = 0,005$ не будет обеспечена ни для одного из объектов, а $(\delta t_x)_2 = \pm 3,27; \pm 2,4; \pm 1,85^\circ\text{C}$, и к предъявленным требованиям будет сравнительно близка только для третьего объекта с температурой $+25^\circ\text{C}$.

Влияние погрешности задания коэффициента пропускания воздуха. Воздух, находящийся между объектом и ИК-прибором, поглощает и рассеивает излучение и характеризуется коэффициентом пропускания τ . Даже для чистой атмосферы в зависимости от расстояния и влагосодержания τ может заметно отличаться от единицы, а для замутнённой атмосферы, содержащей различные взвешенные частицы, это отличие может быть еще больше.

В условиях чистой атмосферы относительная погрешность $\delta\tau/\tau$ зависит от погрешностей измерений температуры и влажности воздуха и может составлять 1% и меньше. В условиях замутнённой атмосферы коэффициент τ сильно зависит от концентрации, размеров и природы взвешенных частиц, что затрудняет его точное определение. Существуют приблизительные методики оценки τ по метеорологической дальности видимости [2, 3, 5]. Выбрав по определённым закономерностям максимальную дистанцию измерения, можно обеспечить условие, при котором τ замутнённой атмосферы близок к единице с погрешностью $2\text{--}5\%$. В условиях туманов можно достаточно точно вычислить значение τ практически на любой дистанции измерения [6].

Коэффициент Φ_τ — функция, зависящая от температур T_x , T_0 , T_b , а

также коэффициента излучения ϵ [1]. Для иллюстрации основных характерных особенностей поведения этого коэффициента примем $t_0 = +80^\circ\text{C}$. Коэффициент ϵ может оказывать сильное влияние на Φ_τ , поэтому в расчётах использованы три принципиально различных его значения: $\epsilon = 1; 0,75; 0,5$.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента Φ_τ от измеряемой температуры t_x и коэффициента ϵ для диапазонов $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ при различных соотношениях между t_0, t_b .

Когда у обследуемого объекта $\epsilon \rightarrow 1$, локальная параметрическая относительная погрешность

$$|\Delta_3| = |(\delta T_x/T_x)_3| = |(\delta\tau/\tau)\Phi_\tau| \quad (7)$$

перестает зависеть от температуры t_0 . Если при этом $t_x = t_b$, то $|\Delta_3| = 0$; когда $t_x < t_b$, значение $|\Delta_3|$ резко увеличивается, при $t_x \gg t_b$ — растёт медленно, подчиняясь закономерности, совпадающей с приведённой на рис. 1, а, б для $|\Delta_1|$ в условиях $t_x \gg t_0$, причём независимо от ϵ . При $t_0 \rightarrow t_b$ коэффициент ϵ не оказывает влияния на точность измерений и все зависимости $\Phi_\tau(\epsilon)$ приближаются к кривым для $\epsilon=1$, приведённым на рис. 2. Если $t_0 \neq t_b$, то $|\Delta_3|$ во многом зависит от соотношения между этими температурами и значения ϵ . Соответствующие зависимости можно проследить, сравнив кривые для различных температурных условий и разных ϵ . Цифрами 1, 2, 4, 7—9 обозначены кривые, для которых t_b намного ниже t_0 , и при малых значениях ϵ с увеличением измеряемой температуры коэффициент Φ_τ сначала возрастает, а затем начинает уменьшаться (кривые 1, 7, 8). Для кривых 3, 5, 10, 11 температура t_b в расчётах увеличена таким образом, чтобы все зависимости $\Phi_\tau(t_x)$ монотонно убывали даже для малых значений ϵ . В обоих случаях с ростом t_x все кривые приближаются к общим асимптотическим зависимостям, отличающимся для разных спектральных диапазонов.

Из приведённых данных можно сформулировать следующие рекомендации для оценки погрешности измерений (7).

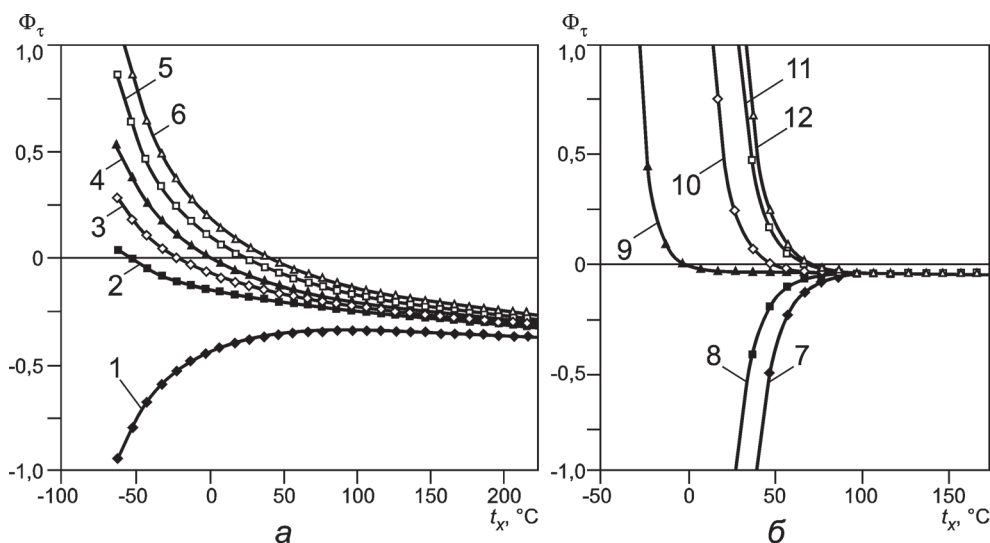


Рис. 2. Зависимость коэффициента Φ_τ от измеряемой температуры t_x для спектральных диапазонов $\Delta\lambda_1 = 8,0\ldots 14,0$ мкм (а) и $\Delta\lambda_2 = 1,0\ldots 1,6$ мкм (б) при $t_0 = 80^\circ\text{C}$, разных температурах воздуха $t_b = 0^\circ\text{C}$ — кривые 1, 2, 4, 7—9; $t_b = 40^\circ\text{C}$ — кривые 3, 5, 6; $t_b = 72^\circ\text{C}$ — кривые 10—12 и различных $\epsilon = 1,0$ (4, 6, 9, 12); $0,75$ (2, 5, 8, 11); $0,5$ (1, 3, 7, 10)

Если t_x намного превышает t_o , t_b , то верхнюю границу погрешности можно оценить, используя (3), (4). В этом случае локальная относительная параметрическая погрешность измерений практически всегда заметно меньше относительной погрешности задания коэффициента τ . Если t_x меньше t_o , t_b , то параметрическая погрешность может превысить погрешность задания τ . В остальных случаях сориентироваться в оценках точности измерений можно по графическим данным, приведённым на рис. 2.

Влияние погрешности задания температуры воздуха.

Указанная погрешность определяется не только погрешностью измерительного прибора, которая может составлять сравнительно малую величину $|\delta T_b/T_b| \approx (1...3) \cdot 10^{-3}$, но и способом измерения температуры. Например, во многих ИК-приборах для этого применён встроенный внутренний датчик, который фактически определяет температуру самого прибора, а не воздуха, находящегося на дистанции измерений. Значит, если прибор находился в одних температурных условиях (в теплом помещении), а затем с его помощью провели измерения при другой температуре (тепловизионные обследования в зимних условиях на открытом воздухе), то в силу тепловой инерции некоторое время измеряемая температура воздуха может отличаться от истинной. При этом в нестационарных условиях погрешность такого задания температуры может составить $|\delta T_b/T_b| \approx 0,1...0,15$, т. е. 10—15 %. Отметим, что разница температур между внутренним датчиком прибора и наружным воздухом часто приводит к значительной погрешности измерений вследствие самокалибровки прибора при температуре, далекой от измеряемой [7]. Уменьшить эту погрешность можно только путем выдержки прибора перед измерениями в новых температурных условиях в течение продолжительного времени.

Как показано в [1], коэффициент Φ_b зависит от T_x , T_b , ε , τ . При этом его зависимость от температур во многом аналогична коэффициенту Φ_o . Если в коэффициенте Φ_o в качестве параметра рассматривать температуру T_o , а в коэффициенте Φ_b — температуру T_b , то связь между ними будет выражаться формулой

$$\Phi_b = \Phi_o(1 - \tau)/[\tau(1 - \varepsilon)] \quad (8)$$

и для локальной погрешности измерений

$$|\Delta_4| = \left| \left(\delta T_b/T_b \right)_4 \right| = \left| \left(\delta T_b/T_b \right) \Phi_b \right| \quad (9)$$

получим основные закономерности влияния t_x , t_b , ранее приведённые на рис. 1, б. Главное здесь то, что при увеличении t_x относительно t_b точность измерений растёт, а при уменьшении — резко падает. Как следует из (8), в условиях прозрачной атмосферы ($\tau \approx 1$) погрешность (9) практически отсутствует. В замутнённой атмосфере ($\tau < 1$) погрешность Δ_4 может оказаться значительной. Например, в диапазоне $\Delta\lambda_1$ при обследовании поверхности с $\varepsilon = 0,9$ в сравнительно прозрачной атмосфере ($\tau = 0,9$) при $t_b = t_x = 0^\circ\text{C}$ с помощью графика 3 на рис. 1, б и формулы (8) можно получить $|\Phi_b| = 0,12$. Если температура воздуха определена с погрешностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$, то локальная погрешность измерений составит все-

го $(\delta t_x)_4 = \pm 0,06^\circ\text{C}$. Для полупрозрачной атмосферы с $\tau = 0,5$ имеем $|\Phi_b| = 1,1$ и погрешность измерений $(\delta t_x)_4 = 0,55^\circ\text{C}$, т. е. точности определения t_b и t_x окажутся сравнимыми.

Заключение. Представленные результаты расчётов показывают основные характерные и количественные зависимости значений относительных параметрических погрешностей измерений температуры от погрешностей задания внешних параметров — коэффициента излучения обследуемой поверхности ε , температуры отражённого излучения T_o , коэффициента пропускания воздуха τ и температуры воздуха T_b . Анализ основных погрешностей выполнен для двух принципиально различных и часто используемых на практике спектральных диапазонов ИК-приборов $\Delta\lambda_1 = 8,0...14,0$ мкм и $\Delta\lambda_2 = 1,0...1,6$ мкм, но следующие из него выводы также могут быть интерпретированы и для других рабочих диапазонов, обычно являющихся промежуточными относительно рассмотренных. Как следует из приведённых графических данных, несмотря на возможную сравнительно высокую точность задания внешних параметров, присутствует существенная зависимость погрешностей от измеряемой температуры. Эти погрешности могут заметно возрастать при высокотемпературных источниках фонового излучения и при обследованиях холодных объектов в теплой атмосфере. Погрешности также могут оказаться значительными при обследованиях объектов со сравнительно малым коэффициентом излучения и в условиях замутнённой атмосферы.

Результаты можно использовать при количественных оценках возможных погрешностей в практике ИК-измерений температуры и в работах по увеличению точности измерений.

Л и т е р а т у р а

1. Левин Е. В., Окунев А. Ю. Исследование точности измерения температуры на основе анализа энергетического баланса на приемнике излучения ИК-прибора // Измерительная техника. 2015. № 5. С. 48—52.
2. Левин Е. В., Окунев А. Ю., Умнякова Н. П., Шубин И. Л. Основы современной строительной термографии. М.: НИИСФ РААСН, 2012.
3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1968.
4. Брамсон М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел. М.: Наука, 1964.
5. ГОСТ Р 54852—2011. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций.
6. Левин Е. В., Окунев А. Ю. Инфракрасное термографирование объектов в условиях туманов. Выбор дистанции измерения // Жилищное строительство. 2015. № 6. С. 51—56.
7. Левин Е. В., Окунев А. Ю. К вопросу об определении распределения температур на поверхности строительных объектов тепловизионным методом // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. № 3. С. 245—256.

Дата принятия 24.03.2015 г.