

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

**Ю. И. ШТЕРН, Я. С. КОЖЕВНИКОВ, В. А. МЕДВЕДЕВ, М. Ю. ШТЕРН,
Р. Е. МИРОНОВ**

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Москва, Россия, e-mail: r.e.mironov@gmail.com*

Проведена оценка доверительных границ систематической погрешности измерения индивидуального потребления тепловой энергии при помощи оригинальной методики, основанной на использовании высокоточных интеллектуальных датчиков температуры с беспроводным интерфейсом.

Ключевые слова: *тепловая энергия, интеллектуальные датчики температуры, погрешность измерения.*

Estimation of the limits of systematic inaccuracy of measuring of individual heat energy consumption by the original method based on the using of high-accuracy intellectual temperature transducers with wireless interface was carried out.

Key words: *thermal energy, smart temperature sensors, measurement error.*

Для учета индивидуального потребления тепловой энергии авторами данной статьи создана не имеющая аналогов интеллектуальная измерительная система контроля и учета потребления энергоресурсов, организуемая по единому сетевому принципу [1, 2]. С ее помощью напрямую измеряют потребленные тепловую энергию, холодную и горячую воду, выполняя прием данных по радиоканалу на частотах 434 или 868 МГц от беспроводных измерителей температуры, расхода объема воды и теплоносителя, выполняя также вычисления и индикацию результатов. В качестве термометров используют беспроводные измерители температуры ИТБ-1. Счетчики горячей и холодной воды с импульсным выходом каналов измерений объемов воды

подключают к двухканальному беспроводному счетчику импульсов СИБ-2К. В роли расходомеров теплоносителя в каналах измерений тепловой энергии выступают приборы с импульсным выходом, подключающиеся к одноканальному беспроводному счетчику импульсов СИБ-1К. Термометры и расходомеры воды устанавливают на трубопроводах систем отопления и водоснабжения. Данные передают на этажные ретрансляторы локальные РЛ-1, а затем по проводному или беспроводному интерфейсу на сервер, представляющий собой промышленный компьютер. Предлагаемый в системе индивидуальный учет тепловой энергии основывается на использовании высокоточных средств измерения температуры – ИТБ-1 с абсолютной погрешностью измерений $\pm 0,05$ °C [3].

В процессе исследований оценивают доверительные границы систематической погрешности измерения разности температур теплоносителя в системах отопления в соответствии с Рекомендациями [4], которые основываются на основных положениях, используемых в Руководстве [5], разработанном под эгидой Международного комитета мер и весов (МКМВ) Международной организацией по стандартизации (ИСО), Международной организацией по законодательной метрологии (МОЗМ) и др.

Оценку суммарной стандартной неопределенности рассчитывают как

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2},$$

где u_a , u_b – стандартные неопределенности, оцененные по типам «А» путем статистического анализа результатов многократных измерений и «В» (в качестве исходных данных для вычислений использованы данные поверки, калибровки и др.)

В связи с тем, что статистический анализ результатов многократных измерений не проводился, рассмотрим систематическую погрешность как неопределенность измерений, вычисленную по типу «В», т. е. с использованием исходных данных по калибровке ИТБ-1. В данном случае суммарная стандартная неопределенность равна [4]:

$$u_{c\Delta t} = \sqrt{u_{ct1}^2 + u_{ct2}^2},$$

где u_{ct1} , u_{ct2} – суммарные стандартные неопределенности для температур t_1 и t_2 , соответственно, $u_{ct1} = u_{ct2} = b_i / \sqrt{3}$, b_i – симметричные границы

отклонения измеряемой величины от результата измерений (в случае ИТБ-1 $b_i = 0,05$ °C); t_1, t_2 – температуры теплоносителя в стояке на входе и выходе в отапливаемую квартиру, соответственно.

Результаты расчета относительной стандартной неопределенности определения разности температур теплоносителя, приходящейся на одну квартиру ($\Delta t = t_2 - t_1$) $\delta u_{c\Delta t} = \frac{u_{c\Delta t}}{\Delta t} 100$, представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета относительной стандартной неопределенности

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Относительная стандартная неопределенность по $\Delta t (\delta u_{c\Delta t}), \%$
0,3	13,61
0,5	8,16
1,0	4,08
1,5	2,72
2,0	2,04
2,5	1,63
3,0	1,36

На рис. 1 изображен график зависимости относительной стандартной неопределенности измерения Δt от значения разности температур теплоносителя, приходящейся на одну квартиру. Для расчета относительной доверительной погрешности определения тепловой энергии найдем расширенную неопределенность с доверительной вероятностью p и коэффициентом охвата $k(p)$ [4]:

$$U = k(p)u_c. \quad (1)$$

Коэффициент охвата выбирается в соответствии с формулой

$$k(p) = t_p(v_3),$$

где $t_p(v_3)$ – квантиль распределения Стьюдента с эффективным числом степеней свободы v_3 и доверительной вероятностью p . Значения $t_p(v_3)$ приведены в [4].

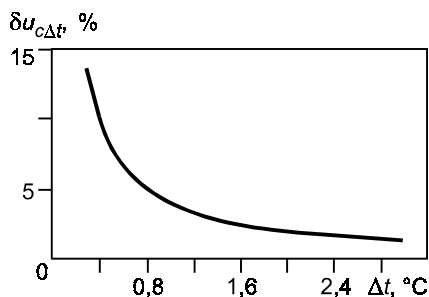


Рис. 1. Относительная стандартная неопределенность измерения разности температур

Количество тепловой энергии определяется как

$$Q = cm\Delta t, \quad (2)$$

где c , m – удельная теплоемкость и масса теплоносителя.

Таким образом, исходя из (1), (2) расширенная неопределенность по тепловой энергии равна

$$U_Q = k(p) \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial m}\right)^2 u_{cm}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \Delta t}\right)^2 u_{c\Delta t}^2} = k(p) \sqrt{u_{cm}^2 \Delta t^2 c^2 + u_{c\Delta t}^2 m^2 c^2},$$

где u_{cm} , $u_{c\Delta t}$ – суммарные стандартные неопределенности определения массы и разности температур, соответственно.

Рассчитаем относительную доверительную погрешность определения тепловой энергии (относительную расширенную неопределенность по Q)

$$\delta U_Q = \frac{U_Q}{Q} 100 = k(p) \sqrt{\frac{u_{cm}^2}{m^2} + \frac{u_{c\Delta t}^2}{\Delta t^2}} 100,$$

или

$$\delta U_Q = k(p) \sqrt{(\delta u_{cm})^2 + (\delta u_{c\Delta t})^2}. \quad (3)$$

Во многих случаях для вычисления неопределенностей результатов, при равномерном законе распределения, делают предположение о равномерности закона и полагают, что $k(p) = 1,65$ при $p = 0,95$ [4].

При расчете массы теплоносителя (в данном случае – воды) значение плотности выбирают с учетом его температуры. Так, погрешность расчета массы воды будет определяться погрешностью измерения ее объема, а она с учетом используемых в разработанной системе расходомеров не превышает 2 %, следовательно, относительная стандартная неопределенность измерения массы теплоносителя $\delta u_{cm} = 2$ %.

Результаты расчета относительной доверительной погрешности определения тепловой энергии по (3) представлены в табл. 2.

На рис. 2 показана прямая зависимость относительной погрешности измерения тепловой энергии от разности температур теплоносителя, приходящейся на одну квартиру.

**Результаты расчета относительной доверительной погрешности
определения тепловой энергии**

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Относительная доверительная погрешность, %. Равномерное распределение
0,3	22,69
0,5	13,87
1,0	7,50
1,5	5,57
2,0	4,72
2,5	4,26
3,0	3,99

Используя расчетный температурный график систем отопления многоквартирных домов [6] и данные о средней температуре окружающего воздуха по г. Москве [7] за столетний период осреднения, определим разность температур в стояках отопления, приходящуюся на одну квартиру и соответствующую этой разности температур относительную доверительную погрешность определения тепловой энергии ($\delta Q_{\text{кв}}$) из (3), примем, что один стояк проходит через 10 этажей ($\Delta t_{\text{ст}}/10^\circ\text{C}$). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Используя данные табл. 3 и ежемесячного потребления тепловой энергии многоквартирными домами, рассчитаем средневзвешенную арифметическую погрешность определения тепловой энергии, потребленной одной квартирой за отопительный сезон.

$$\delta \bar{Q}_{\text{кв}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} Q_i \delta Q_{\text{кв}i}}{\sum_{i=1}^{12} Q_i}, \quad (4)$$

где Q_i – количество тепловой энергии, потребленное за месяц i ($i = 5 \dots 9$, $Q = 0$); $\delta Q_{\text{кв}i}$ – погрешность определения тепловой энергии за месяц i .

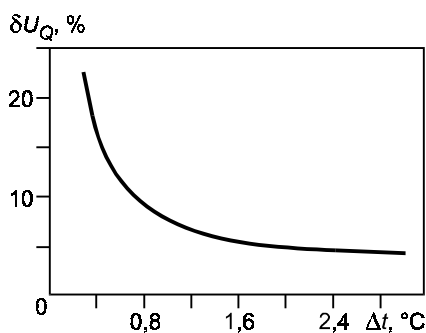


Рис. 2. Относительная доверительная погрешность определения тепловой энергии

**Результаты расчетов разности температур в стояках отопления
и доверительной погрешности определения тепловой энергии**

Месяц	$t_{\text{окр.ср}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{o}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{ст}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{ст}} / 10 ^\circ\text{C}$	$\delta Q_{\text{кв}}, \%$
1	-10,2	71	55	16	1,6	5,36
2	-9,2	69	54	15	1,5	5,58
3	-4,3	62	49	13	1,3	6,13
4	4,4	47	39	8	0,8	9,06
5	11,9	—	—	—	—	—
6	16	—	—	—	—	—
7	18,1	—	—	—	—	—
8	16,3	—	—	—	—	—
9	10,7	—	—	—	—	—
10	4,3	47	39	8	0,8	9,06
11	-1,9	58	46	11	1,1	6,94
12	-7,3	67	52	14	1,4	5,83

П р и м е ч а н и е . $t_{\text{окр.ср}}$ – средняя температура окружающей среды; $t_{\text{п}}$, t_{o} – расчетные температуры подающего и обратного трубопроводов; $\Delta t_{\text{ст}}$ – разность температуры подающего и обратного трубопроводов отопительного стояка.

Определение погрешности $\delta Q_{\text{кв}}$ по количеству потребленной тепловой энергии за месяц достаточно трудоемкая и сложная задача, так как Q зависит от типа здания и свойств системы отопления. Однако если принять, что при качественном (температурном) регулировании системы отопления массовый расход теплоносителя практически не меняется ($m = \text{const}$) и его теплофизические свойства постоянны ($c = \text{const}$), то, согласно (2), (4), получим выражение для определения средневзвешенной арифметической погрешности потребленной за отопительный сезон тепловой энергии

$$\delta \bar{Q}_{\text{кв}} = \sum_{i=1}^{12} \frac{\Delta t_{\text{ст}i}}{10} \delta Q_{\text{кв}i} \bigg/ \sum_{i=1}^{12} \frac{\Delta t_{\text{ст}i}}{10}, \quad (5)$$

где $\Delta t_{\text{ст}i}$ – разность температуры подающего и обратного трубопроводов отопительного стояка в i месяц.

Таким образом, из (5) и данных табл. 3 следует, что средневзвешенная арифметическая погрешность определения тепловой энергии, потребленной одной квартирой за отопительный сезон, составляет не

более 6,5 %, что является вполне приемлемым. Необходимо также отметить, что эта погрешность ниже, чем у единственного альтернативного способа индивидуального учета тепловой энергии, основанного на использовании распределителей потребленного тепла [8].

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Пат. **2374566 РФ**. Система измерения и учета поквартирного потребляемого тепла в системах теплоснабжения /В. А. Беспалов и др. // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 33.

2. Штерн Ю. И., Кожевников Я. С., Рыков В. М. Интеллектуальная система контроля индивидуального потребления энергоресурсов. //Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012 № 12. С. 52 – 58.

3. Пат. **2450250 РФ**. Устройство для измерения температуры теплоносителя и беспроводной измеритель температуры /Я. С. Кожевников и др. //Изобретения. Полезные модели. 2012. № 13.

4. РМГ **43–2001**. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».

5. **Руководство** по выражению неопределенности измерений /Пер. с англ. /Под ред. В.А. Слаева. СПб.: ВНИИМ, 1999.

6. Манюк В. И. и др. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей. Справочник. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.

7. **Строительная** климатология: Справ. пособие к СНиП 23-01-99 /Под ред. В. К. Савина. М.: НИИ строительной физики РААСН, 2006.

8. **Медведев В. А.** Счетчики-распределители теплоснабжения. Метрологические аспекты // Мир измерений. 2004. № 5. С. 17 – 19.

Дата принятия 29.01.2013 г.

