

УДК 621.3.088

Оценка погрешностей вычисления количества теплоты в водяных системах теплоснабжения потребителей



С. Н. Канев,
кандидат технических наук,
доцент, генеральный директор
Хабаровского центра энергоресурсосбережения

Проблема оценки погрешностей вычисления количества теплоты в водяных системах теплоснабжения имеет множество аспектов и различных подходов и периодически возникает при практических вопросах эксплуатации теплосчетчиков. Это связано с отсутствием четкой нормативно-технической базы при нормировании количества теплоты в водяных системах теплоснабжения потребителей.

Ключевые слова: система теплоснабжения, погрешность измерения, теплосчетчик, сертификация.

Введение

Вопросу оценки погрешности вычисления количества теплоты в системах теплоснабжения потребителей посвящено множество публикаций [1] – [11]. Однако и в настоящее время данная проблема актуальна, имеет множество аспектов и различных подходов и периодически возникает при практических вопросах эксплуатации теплосчетчиков. Это связано с отсутствием четкой нормативно-технической базы при нормировании количества теплоты в водяных системах теплоснабжения потребителей.

На сегодняшний день в России имеется несколько противоречащих друг другу концепций.

1. Теплосчетчик – это измерительная система, состоящая из одного (закрытая система) или нескольких измерительных каналов (открытая система). Поэтому нет необходимости оценивать и нормировать погрешность вычисления количества теплоты – достаточно, чтобы погрешность каждого средства измерения, входящего в состав измерительного канала, не выходила за пределы нормированной погрешности измерения для данного средства измерения.

2. Теплосчетчики как для закрытой, так и для открытой системы должны вычислять количество теплоты с погрешностью, не превышающей нормированное значение, указанное в Правилах учета тепловой энергии и теплоносителя.

3. Теплосчетчики должны вычислять количество теплоты с погрешностью, не превышающей нормированное значение. При этом рассматриваются различные способы нормирования.

Заметим, что концепция 1 существенно отличается от концепций 2 и 3: по первой концепции погрешность вычисления количества теплоты не надо нормировать вообще, а по концепции 2 и 3 погрешность вычисления количества теплоты необходимо нормировать, только способы нормирования могут быть различные.

С вопросами нормирования погрешности вычисления количества теплоты в закрытых системах теплоснабжения (один измерительный канал) все более или менее понятно, хотя существуют различные мнения, например [6] или [7], а вот с вопросами нормирования этой величины в открытых системах теплоснабжения нет однозначного решения. В [8] сделана попытка решить эту проблему, однако, как

будет показано ниже, эта концепция далека от совершенства.

Из-за отсутствия нормативно-технической базы при нормировании количества теплоты в открытых водяных системах теплоснабжения в последнее время энергоснабжающие организации в различных регионах России стали подвергать сомнению результаты вычисления количества теплоты многоканальными теплосчетчиками. Мотивировка простая – погрешность вычисления количества теплоты теплосчетчиками в открытых системах теплоснабжения превышает нормированное значение, указанное в [6]. Однако при этом умалчивают тот факт, что нормированное в [6] значение погрешности вычисления количества теплоты справедливо только для закрытых систем теплоснабжения, т.е. для одноканальных теплосчетчиков; это будет показано ниже.

Исходя из вышеизложенного появилась потребность в написании данной статьи.

Рассмотрим проблему с практической точки зрения.

Наиболее часто в водяных системах теплоснабжения потребителей используются нижеприведенные уравнения для вычисления количества теплоты. При этом для простоты рассмотрим случай $h_{\text{хв}}=0$ и примем, что $h=c_p t$. В этом случае получим:

$$Q=M_1(t_1-t_2), \quad (1)$$

$$Q=M_1 t_1 - M_2 t_2, \quad (2)$$

$$Q=M_1(t_1-t_2)+(M_1-M_2)t_2, \quad (3)$$

$$Q=M_2(t_1-t_2)+(M_1-M_2)t_1, \quad (4)$$

$$Q=M_1(t_1-t_2)+M_3 t_2. \quad (5)$$

В этих формулах приняты следующие обозначения: M_1, M_2, M_3 – масса теплоносителя, прошедшего за расчетный период по подающему, обратному трубопроводу и трубопроводу горячего водоснабжения, соответственно; t_1, t_2, t_3 – температуры теплоносителя в подающем, обратном и трубопроводе ГВС, соответственно. Причем отметим, что

$$M_3=M_{\text{ГВС}} \neq M_{\text{УТ}}, \text{ где } M_{\text{УТ}}=M_1-M_2.$$

Заметим, что формула (1) справедлива только для закрытой системы теплоснабжения, формула (5) справедлива для открытой системы теплоснабжения, а формулы (2)–(4) справедливы для обоих типов систем: закрытой и открытой. Легко можно убедиться, что формулы (2)–(4) эквивалентны друг другу, но не эквивалентны формуле (5), если $M_3 \neq M_1 - M_2$. Отметим также, что при $M_1=M_2$ формулы (2)–(4) превращаются в формулу (1).

Покажем, что хотя формулы (2)–(4) эквивалентны друг другу, тем не менее, относительная погрешность вычисления количества теплоты по этим формулам различна, т.е. в зависимости от выбранной формулы возникает своя методическая погрешность.

Оценим относительную погрешность вычисления количества теплоты по формулам (1)–(5), используя алгебраическое сложение погрешностей с учетом их знаков. Такой подход использован в [1], [2], [4]. В работах [3], [5] используется геометрическое сложение.

Расчетные формулы для оценки относительной погрешности вычислений количества теплоты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетная формула для вычисления количества теплоты Q	Расчетная формула для вычисления относительной погрешности количества теплоты α
$Q=M_1(t_1-t_2)$	$\delta Q = \delta M_1 + \delta(\Delta t)$
$Q=M_1 t_1 - M_2 t_2$	$\delta Q = \frac{1}{1-\alpha\beta} [\delta M_1 - \alpha\beta\delta M_2 + \delta t_1 - \alpha\beta\delta t_2] = c_1\delta M_1 + c_2\delta t_2$
$Q=M_1(t_1-t_2)+(M_1-M_2)t_2$	$\delta Q = \frac{1}{1-\alpha\beta} [\delta M_1 - \alpha\beta\delta M_2 + (1-\beta)\delta(\Delta t) + \beta(1-\alpha)\delta t_2] = c_1\delta M_1 + c_3\delta(\Delta t) + c_4\delta t_2$
$Q=M_2(t_1-t_2)+(M_1-M_2)t_1$	$\delta Q = \frac{1}{1-\alpha\beta} [\delta M_1 - \alpha\beta\delta M_2 + (1-\alpha)\delta t_1 + (1-\beta)\alpha\delta(\Delta t)] = c_1\delta M_1 + c_3\delta(\Delta t) + c_6\delta t_2$
$Q=M_1(t_1-t_2)+M_3 t_2$	$\delta Q = \frac{1}{1-\beta+\gamma\beta} [(1-\beta)\delta M_1 + \beta\gamma\delta M_3 + (1-\beta)\delta(\Delta t) + \beta\gamma\delta t_2] = c_7\delta M_1 + c_8\delta(\Delta t) + c_9\delta t_2$

Заметим, что расчетные формулы для вычисления, приведенные в табл. 1, совпадают с аналогичными формулами, приведенными в [4], [11] при $t_{\text{хв}}=0$.

В данных формулах принять обозначения:

$$\alpha = M_2 / M_1, \beta = t_2 / t_1, \gamma = M_3 / M_1;$$

$$c_1 = \frac{1 - \alpha\beta(\delta M_2 / \delta M_1)}{1 - \alpha\beta} = \frac{1 + \alpha\beta}{1 - \alpha\beta} \text{ при } \delta M_2 = -\delta M_1;$$

$$c_2 = \frac{1 - \alpha\beta(\delta t_2 / \delta t_1)}{1 - \alpha\beta}; c_3 = \frac{1 - \beta}{1 - \alpha\beta}; c_4 = \frac{(1 - \alpha)\beta}{1 - \alpha\beta};$$

$$c_5 = \frac{\alpha(1 - \beta)}{1 - \alpha\beta} = c_3\alpha; c_6 = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha\beta} = \frac{c_4}{\beta};$$

$$c_7 = \frac{1 - \beta + \beta\gamma(\delta M_3 / \delta M_1)}{1 - \beta + \beta\gamma} = 1 \text{ при } \delta M_3 = \delta M_1;$$

$$c_8 = \frac{1 - \beta}{1 - \beta + \gamma\beta} = \frac{1 - \beta}{1 + \beta(\gamma - 1)}; c_9 = \frac{\gamma\beta}{1 - \beta + \gamma\beta} = \frac{\beta\gamma}{1 + \beta(\gamma - 1)}.$$

В формуле для расчета c_1 рассмотрен самый неблагоприятный случай, когда расходомеры, установленные на подающем и обратном трубопроводах систем теплоснабжения, имеют одинаковую относи-

тельную погрешность измерения, но с разным знаком, т.е. $\delta M_1 = -\delta M_2$. В случае когда $\delta M_1 = \delta M_2$ имеем $c_1=1$, т.е. наиболее благоприятный случай, его мы не рассматриваем.

При расчетах погрешностей вычисления количества теплоты рассмотрим виртуальный теплосчетчик, в состав которого входят 1-3 расходомера с $\delta M=2\%$ и согласованная пара термометров КТСП-Р класса В (наихудший вариант). В соответствии с паспортом на КТСП-Р имеем:

- предел допускаемой абсолютной погрешности при измерении температуры составляет $\Delta t = \pm(0,3 + 0,005t)^\circ \text{C}$;
- предел допускаемой погрешности измерений разности температур $\delta(\Delta t) = \pm\left(0,5 + \frac{3\Delta t_{\text{min}}}{\Delta t}\right)\%$.

Причем заметим, что $\delta(\Delta t)$ имеет одинаковое значение как для класса А, так и для класса В.

В соответствии с [6] рассмотрим два случая, для которых в [6] нормирована относительная погрешность вычисления количества теплоты:

- $10^\circ \text{C} \leq \Delta t = t_1 - t_2 \leq 20^\circ \text{C}$, $\delta Q_{\text{доп}} = 5\%$;
- $\Delta t = t_1 - t_2 > 20^\circ \text{C}$, $\delta Q_{\text{доп}} = 4\%$.

Таблица 2

Коэффициент	Степень открытости системы, α			
	1,0	0,9	0,8	0,7
$c_1 = \frac{1 + \alpha\beta}{1 - \alpha\beta}$	17	9	6	4
$c_2 = \frac{1 - \alpha\beta(\delta t_2 / \delta t_1)}{1 - \alpha\beta}$	0,5	0,76	0,85	1,59
$c_3 = \frac{1 - \beta}{1 - \alpha\beta}$	1	0,55	0,38	0,3
$c_4 = \frac{(1 - \alpha)\beta}{1 - \alpha\beta}$	0	0,44	0,62	1,25
$c_5 = \frac{\alpha(1 - \beta)}{1 - \alpha\beta} = c_3\alpha$	1	0,495	0,3	0,21
$c_6 = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha\beta} = \frac{c_4}{\beta}$	0	0,494	0,67	1,4
$\gamma = 1 - \alpha$	0	0,1	0,2	0,3
c_7	1	1	1	1
$c_8 = \frac{1 - \beta}{1 + \beta(\gamma - 1)}$	1	0,23	0,25	0,29
$c_9 = \frac{\beta\gamma}{1 + \beta(\gamma - 1)}$	0	0,45	0,62	0,71

Случай 1

$t_1=90^{\circ}\text{C}$, $t_2=80^{\circ}\text{C}$, $\Delta t=t_1-t_2=10^{\circ}\text{C}$, $\delta M_1=2\%$,
 $\Delta t_{\min}=3^{\circ}\text{C}$, $\delta(\Delta t)=1,4\%$, $\beta=0,89$, $\delta t_1=0,83\%$, $\delta t_2=0,88\%$.

Численные значения коэффициентов c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 в зависимости от степени открытости системы для данного случая приведены в табл. 2.

за счет измерения расхода, а второе слагаемое – за счет измерения температуры и разности температур.

Результаты расчетов относительной погрешности вычисления количества теплоты для первого случая приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетная формула	$\alpha=1$			$\alpha=0,9$			$\alpha=0,8$			$\alpha=0,7$		
	$\delta Q(M)$	$\delta Q(t, \Delta t)$	δQ	$\delta Q(M)$	$\delta Q(t, \Delta t)$	δQ	$\delta Q(M)$	$\delta Q(t, \Delta t)$	δQ	$\delta Q(M)$	$\delta Q(t, \Delta t)$	δQ
$Q=M_1(t_1-t_2)$	2	1,4	3,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$Q=M_1 t_1 - M_2 t_2$	34	0,4	34,4	18	0,6	18,6	12	0,7	12,7	8	1,3	9,3
$Q=M_1(t_1-t_2)+(M_1-M_2)t_2$	34	1,4	35,4	18	1,2	19,2	12	1,05	13,05	8	1,5	9,5
$Q=M_2(t_1-t_2)+(M_1-M_2)t_1$	34	1,4	35,4	18	0,8	18,8	12	1	13	8	1,5	9,5
$Q=M_1(t_1-t_2)+M_3 t_2$	2	1,4	3,4	2	0,7	2,7	2	0,9	2,9	2	1	3

Все формулы в табл. 2 для расчета относительной погрешности количества теплоты можно обобщить в виде единой формулы

$$\delta Q = \delta Q(M) + \delta Q(t, \Delta t), \quad (6)$$

в которой первое слагаемое обозначает вклад в погрешность вычисления количества теплоты

Случай 2

$t_1=95^{\circ}\text{C}$, $t_2=50^{\circ}\text{C}$, $\Delta t=t_1-t_2=45^{\circ}\text{C}$, $\delta M_1=2\%$,
 $\Delta t_{\min}=3^{\circ}\text{C}$, $\delta(\Delta t)=0,5\%$, $\beta=0,53$, $\delta t_1=0,82\%$, $\delta t_2=1,1\%$.

Численные значения коэффициентов c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 в зависимости от степени открытости системы для данного случая приведены в табл. 4.

Таблица 4

Коэффициент	Степень открытости системы, α			
	1,0	0,9	0,8	0,7
$c_1 = \frac{1+\alpha\beta}{1-\alpha\beta}$	3,25	2,8	2,5	2,2
$c_2 = \frac{1-\alpha\beta(\delta t_2 / \delta t_1)}{1-\alpha\beta}$	0,6	0,69	0,75	0,8
$c_3 = \frac{1-\beta}{1-\alpha\beta}$	1	0,9	0,81	0,75
$c_4 = \frac{(1-\alpha)\beta}{1-\alpha\beta}$	0	0,1	0,18	0,25
$c_5 = c_3 \alpha$	1	0,81	0,65	0,52
$c_6 = c_4 / \beta$	0	0,19	0,34	0,47
$\gamma = 1 - \alpha$	0	0,1	0,2	0,3
c_7	1	1	1	1
$c_8 = \frac{1-\beta}{1+\beta(\gamma-1)}$	1	0,81	0,75	0,7
$c_9 = \frac{\beta\gamma}{1+\beta(\gamma-1)}$	0	0,09	0,17	0,24

Результаты расчетов относительной погрешности вычисления количества теплоты для второго случая приведены в табл. 5.

Из табл. 3 и 5 видно, что при вычислении количества теплоты по формулам (1), (5) относительная

погрешность имеет наименьшее значение, не превышающее значение $\delta Q=4\%$, т.е. в этом случае мы имеем полное соответствие с [6].

Таблица 5

Расчетная формула	$\alpha=1$			$\alpha=0,9$			$\alpha=0,8$			$\alpha=0,7$		
	$\delta Q(M)$	$\delta Q(t, \Delta t)$	δQ	$\delta Q(M)$	$\delta Q(t, \Delta t)$	δQ	$\delta Q(M)$	$\delta Q(t, \Delta t)$	δQ	$\delta Q(M)$	$\delta Q(t, \Delta t)$	δQ
$Q=M_1(t_1-t_2)$	2	0,5	2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$Q=M_1t_1-M_2t_2$	6,5	0,5	7,0	5,6	0,6	6,2	5,0	0,6	5,6	4,4	0,7	5,1
$Q=M_1(t_1-t_2)+(M_1-M_2)t_2$	6,5	0,5	7,0	5,6	0,5	6,1	5,0	0,5	5,5	4,4	0,5	4,9
$Q=M_2(t_1-t_2)+(M_1-M_2)t_1$	6,5	0,5	7,0	5,6	0,56	6,2	5,0	0,6	5,6	4,4	0,64	5,0
$Q=M_1(t_1-t_2)+M_3t_2$	2	0,5	2,5	2	0,48	2,48	2	0,5	2,5	2	0,55	2,55

погрешность имеет наименьшее значение, не превышающее значение $\delta Q=4\%$, т.е. в этом случае мы имеем полное соответствие с [6].

Если же вычислять количество теплоты по формулам (2)–(4), в которые явным и неявным образом входит разность расходов (M_1-M_2), то возникает методическая погрешность из-за вычисления этой разности, которая дает вклад в суммарную погрешность от 6 до 34% в зависимости от степени открытости системы. При этом суммарная погрешность вычисления количества теплоты составляет 7–35%, что идет вразрез с [6].

Заметим, что при расчетах относительной погрешности вычисления количества теплоты мы пренебрегли погрешностью канала тепловычислителя по определению количества теплоты, которая, как правило, не превышает 0,3%.

Отметим также, что случай 1 не соответствует реальности, так как в этом случае мы имеем заметное превышение температуры в обратном трубопроводе по сравнению с расчетной. Поэтому остановимся на втором случае и проанализируем его более подробно, так как он соответствует реальным условиям эксплуатации узла учета.

Из анализа табл. 5 видно, что вне зависимости от степени открытости системы относительная погрешность вычисления количества теплоты по формулам (1), (5) не превышает 3%, что вполне соответствует [6]. Однако при расчетах этой погрешности по формулам (2)–(4) она составляет в зависимости от открытости системы 5–7%, что «вроде бы» формально не соответствует [6]. Причем основной вклад, около 90%, дает погрешность, связанная с вычислением расхода, и только около 10% дает погрешность, связанная с измерением температуры и разности температур. Поэтому для измерения температуры теплоносителя можно применить согласованные пары термометров сопротивления как класса А, так и класса В.

Покажем теперь, что полученные значения относительной погрешности вычисления количества теп-

лоты, рассчитанные по любой из формул (1)–(5), не противоречат Правилам учета [6]. В Правилах учета величина относительной погрешности вычисления количества теплоты нормирована только для закры-

тых систем и не нормирована для открытых систем теплоснабжения. Поясним это более подробно.

$$Q_{\text{И}}=M_1(h_1-h_2)=M_1(t_1-t_2). \quad (7)$$

Это уравнение полностью соответствует алгоритму вычисления количества теплоты для закрытых систем теплоснабжения и метрологически корректно обеспечивает требуемую [6] относительную погрешность измерения количества теплоты при условии полного возврата теплоносителя.

Суммарное же количество теплоты, полученной потребителем, определяется энергоснабжающей организацией на основании показаний приборов узла учета абонента за расчетный период, определенный договором, по формуле (3.1) из [6], где теплосчетчиком измеряется только одна составляющая полученного абонентом количества теплоты $Q_{\text{И}}$, которая и нормируется. Две другие составляющие формулы (3.1) метрологически не нормируются и определяются расчетным путем. Вторая составляющая $Q_{\text{П}}$ (тепловые потери) в формуле (3.1) к измерительному аспекту учета отношения не имеет, и поэтому ее рассматривать не будем.

Третья составляющая $(M_{\text{П}}+M_{\text{ГВ}}+M_{\text{У}})(h_{2\text{И}}-h_{\text{ХВ}})$ должна рассчитываться энергоснабжающей организацией по измеренным у потребителя с помощью приборов учета величинам $M_{\text{П}}$, $M_{\text{ГВ}}$, $M_{\text{У}}=M_1-(M_2+M_{\text{ГВ}})$ и значению энтальпии сетевой воды на выводе обратного трубопровода источника теплоты. Эта составляющая и дает весомый вклад в суммарную погрешность вычисления количества теплоты, но при этом метрологически не оценивается и не нормируется.

Для того чтобы уйти от приборно-расчетного метода, на практике в формулу (3.1) вместо $h_{2\text{И}}$ подставляют величину h_2 , рассчитанную по температуре воды t_2 в обратном трубопроводе систем теплоснабжения потребителя, а не источника. Однако вклад этой

составляющей в погрешность вычисления количества теплоты в [6] не учитывается и не нормируется.

Поведем итог: в [6] нормирована не суммарная погрешность вычисления количества теплоты в открытых системах теплоснабжения, а только величина погрешности вычисления, входящая в первое слагаемое формулы (3.1), второе слагаемое, которое и дает существенный вклад в погрешность измерения, при этом не нормируется. Поэтому Правила [6] нормируют относительную погрешность вычисления количества теплоты только в закрытых системах теплоснабжения, а для открытых систем в [6] эта величина не нормируется и может значительно превышать значения 4 и 5%, приведенные в [6].

В [7] предельно допустимая относительная погрешность вычисления количества теплоты измерительного канала теплосчетчика класса С нормируется формулой

$$\delta Q_{\text{доп}} = \pm(2 + 4\Delta t_{\text{min}}/\Delta t + 0,01G_{\text{max}}/G), \quad (8)$$

т.е. видим, что эта величина для одноканального теплосчетчика (закрытая система) зависит от величины G_{max}/G и если рассмотреть теплосчетчик, у которого $G_{\text{max}}/G=1000$, то получим $\delta Q_{\text{доп}}=12$ и более процентов, что значительно превышает величину, регламентируемую в [6].

Отметим, что п. 5.2.1 [6] устанавливает требования к метрологическим характеристикам приборов учета, измеряющим тепловую энергию и параметры теплоносителя, для условий эксплуатации, определенных договором. Попытка нормирования погрешности вычисления количества теплоты в открытых системах теплоснабжения сделана в [8]. В [8] прописано, что нормирование пределов допускаемой погрешности двухканальных теплосчетчиков осуществляется с использованием нормированных метрологических характеристик средств измерений, входящих в состав теплосчетчика, и с учетом предельных режимов работы, для которых предназначен теплосчетчик.

Отметим, что между [6] и [8] имеется противоречие: в [6] идет речь о режимах работы в условиях эксплуатации, в [8] – о предельных режимах работы теплосчетчика, которые гораздо шире, чем в условиях эксплуатации.

В [8] предлагается формула для расчета допускаемой относительной погрешности δQ , % двухканального теплосчетчика:

$$\delta Q_{\text{доп}} = \frac{1,1\sqrt{(f_{\text{max}}\Delta_1)^2 + [(1-f_{\text{max}})\Delta_2]^2 + [\delta G(t_{1\text{min}} - t_{k\text{min}})]^2} + [\delta G f_{\text{max}} \{(1-k_{\text{min}})t_{1\text{min}} - t_{k\text{min}}\}]^2}{f_{\text{max}}k_{\text{min}}t_{1\text{min}} + (1-f_{\text{max}})(t_{1\text{min}} - t_{k\text{min}})} \times 100, \quad (9)$$

где $f_{\text{max}}=(M_2/M_1)_{\text{max}}$ – максимально возможное значение отношения масс теплоносителя, прошедших по обратному и подающему трубопроводам;

$k_{\text{min}}=(t_2/t_1)/t_1$ – минимально возможное значение коэффициента k ;

Δ_1 – предел допускаемой абсолютной погрешности измерений разности температур $\Delta t_1 = t_1 - t_2$, рассчитываемый по формуле $\Delta_1 = \pm(0,1 + 0,005 \Delta t_1)$;

Δ_2 – предел допускаемой абсолютной погрешности измерений разности температур $\Delta t_2 = t_1 - t_k$, рассчитываемый по формуле $\Delta_2 = \pm(0,1 + 0,005 \Delta t_2)$, где t_k – константное значение температуры холодной воды;

δG – предел допускаемой относительной погрешности измерений массового расхода теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, доли единицы.

Приняв $f_{\text{max}}=1$, $f_k=0$ и обозначив $\delta G=\delta M$, получим

$$\delta Q_{\text{доп}} = \frac{1,1\sqrt{(\Delta_1)^2 + (t_1\delta M)^2 + (\delta M(1-k)t_1)^2}}{kt_1} \times 100. \quad (10)$$

Рассчитав предельно допускаемую относительную погрешность вычисления количества теплоты при $\delta M=2\%$, получим:

- случай 1 ($t_1=90^\circ\text{C}$, $t_2=80^\circ\text{C}$) – $\delta Q_{\text{доп}}=37\%$;
- случай 2 ($t_1=95^\circ\text{C}$, $t_2=50^\circ\text{C}$) – $\delta Q_{\text{доп}}=7\%$.

То есть если оценивать допустимую погрешность вычисления количества теплоты δQ в соответствии с [8], то в рассмотренном нами выше случае 2 мы получим полное соответствие с [8], но противоречие с [6].

Причем в [8] отмечено, что значение f_{max} указывается в технических документах на теплосчетчик. Однако автор ни в одном из технических документов на теплосчетчик не встречал указаний на величину f_{max} . Далее не понятно, где брать величины $t_{1\text{min}}$ и k_{min} – в договоре или технических документах на теплосчетчики.

Оценка пределов погрешностей вычисления количества теплоты в открытых водяных системах теплоснабжения на примере использования теплосчетчика КМ-5 приведена в [9]. В [9] показано, что погрешность вычисления количества теплоты с помощью двухканального теплосчетчика КМ-5 с преобразователем расхода класса точности В1 ($\delta M=2\%$) зависит от диапазона измеряемых расходов теплоносителя G_{max}/G и составляет 6,5% для $\Delta t=10^\circ\text{C}$ и 5,1% для $\Delta t=20^\circ\text{C}$, что противоречит [6]: 5% для $\Delta t=10^\circ\text{C}$ и 4% для $\Delta t=20^\circ\text{C}$, но не противоречит [7]. Отметим, что в [9] $\delta Q_{\text{доп}}$ рассчитано путем геометрического сложения, а если использовать алгебраическое сложение, то получим $\delta Q_{\text{доп}}=8\%$ для $\Delta t=10^\circ\text{C}$ и $\delta Q_{\text{доп}}=6,5\%$ для $\Delta t=10^\circ\text{C}$.

Из всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Относительная погрешность вычисления количества теплоты зависит от алгоритма вычисления количества теплоты, она минимальна для алгоритмов, где не используется вычисление разности расходов, и максимальна в противном случае. Причем эта погрешность определяется в основном методической погрешностью, связанной с измерением расходов – 90% и только 10% приходится на погрешность измерения температур теплоносителя.

2. Оценивать погрешность вычисления количества теплоты надо не для гипотетических режи-

мов, а в предельных условиях эксплуатации. Причем ее можно оценивать путем геометрического сложения погрешностей средств измерений, входящих в состав учета, или путем алгебраического сложения. Различие в этом случае может достигать 25–40 %. Геометрическое суммирование используется в случае, если погрешности отдельных СИ не коррелированы между собой, а алгебраическое, если они коррелированы. Отметим, что при геометрическом сложении с доверительной вероятностью ниже 100 % получаем фактически заниженный результат.

3. Правилами учета нормирована только предельно допустимая погрешность вычисления количества теплоты для одноканального теплосчетчика, в котором реализован алгоритм расчета количества теплоты для закрытой системы, т.е. $Q = M_1(t_1 - t_2)$, причем в Правилах эта величина нормирована в виде численного значения $\delta Q_{\text{доп}} \leq 5\%$, а в ГОСТе на теплосчетчики эта же величина нормирована в виде формулы $\delta Q_{\text{доп}} = \varphi(G_{\text{max}}/G)$ и для некоторых типов теплосчетчиков она может достигать 10 и более процентов.

4. Правилами учета допустимая погрешность вычисления количества теплоты для двух и более канальных теплосчетчиков, использующихся в открытых системах, не нормирована. Она нормирована только в ГОСТ Р 8.591-2002, и для реальных

значений эксплуатации допустимая погрешность вычисления количества теплоты может лежать в пределах от 6 до 9%, что значительно превышает 4–5%, предусмотренных Правилами учета. Причем в данном ГОСТе используется геометрическое сложение погрешностей отдельных СИ с доверительной вероятностью менее 100 %, а если использовать алгебраическое сложение, то эта величина будет около 10 %, что соответствует реальности.

5. Отсутствует единый подход к оценке и нормированию погрешности вычисления количества теплоты, особенно это касается открытых систем теплоснабжения. Нормируемые значения погрешности вычисления количества теплоты, рассчитанные на основе различных нормативных документов, различаются в несколько раз. Поэтому оценка и нормирование погрешности вычисления количества теплоты теряет всякий смысл. И, следовательно, наиболее оптимальной на сегодняшний день является концепция: теплосчетчик – это измерительная система, состоящая из измерительных каналов, включающих в себя аттестованные средства измерения.

Следовательно, нет необходимости сертифицировать отдельно теплосчетчик как средство измерения и вносить его в реестр СИ, достаточно, чтобы были сертифицированы все средства измерения, входящие в состав его измерительных каналов.

Литература

1. Глухов А. П., Канев С. Н. Некоторые аспекты применения новых правил учета тепловой энергии и теплоносителя для открытых систем теплоснабжения // Материалы 4-го семинара «Коммерческий учет энергоносителей». 23–24 апреля. – СПб.: МЦЭНТ, 1996.
2. Черноморченко С. И. К оценке систематической погрешности // Материалы 4-го семинара «Коммерческий учет энергоносителей». 23–24 апреля. – СПб.: МЦЭНТ, 1996.
3. Кудряшова Ж. Ф. Об оценивании погрешностей теплосчетчиков // Материалы 4-го семинара «Коммерческий учет энергоносителей». 23–24 апреля. – СПб.: МЦЭНТ, 1996.
4. МИ 2553-99. Рекомендации ГСОЕИ. Энергия тепловая и теплоноситель в системах теплоснабжения. Методика оценивания погрешности измерений. Основные положения. ВНИИМС. – М., 1999.
5. Зуев П. И., Туберг С. А. Метрологические аспекты приборного учета тепловой энергии и потерь теплоносителя в водяных системах теплоснабжения // Материалы 15-й Международной научно-практической конференции. 23–25 апреля. – СПб.: Борей-Арт, 2002.
6. Правила учета тепловой энергии и теплоносителя. П-863. – М.: Изд-во МЭИ, 1995.
7. ГОСТ Р 51649–2000. Теплосчетчики для водяных систем теплоснабжения. Общие технические условия.
8. ГОСТ Р 8.591–2002. ГСОЕИ. Теплосчетчики двухканальные для водяных систем теплоснабжения. Нормирование пределов допускаемой погрешности при измерениях потребленной абонентами тепловой энергии.
9. Методические указания «Тепловая энергия. Количество и параметры теплоносителя в системах теплоснабжения и водоснабжения». Методика выполнения измерений с помощью теплосчетчиков КМ-5. МВИ 4218-010-42968951-2007.
10. Канев С. Н. Еще раз о наболевших проблемах учета количества теплоты // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 8.
11. Клевакин Е. А., Казанцев В. В. Анализ алгоритмов расчета тепловой энергии, потребленной в открытых системах тепловой энергии // Законодательная и прикладная метрология. – 2007. – № 5.