
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
СТАНДАРТ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р
8.728—
2010

Государственная система обеспечения
единства измерений

**ОЦЕНИВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ
ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ И МАССЫ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ВОДЯНЫХ СИСТЕМАХ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

Москва

2012

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения национальных стандартов Российской Федерации — ГОСТ Р 1.0—2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения»

Сведения о стандарте

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева») Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

2 ВНЕСЕН Управлением метрологии Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 декабря 2010 г. № 994-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячно издаваемых информационных указателях «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет

Содержание

1 Область применения	1
2 Нормативные ссылки	1
3 Основные термины и определения	1
4 Общие положения	2
5 Методика оценивания погрешностей измерений тепловой энергии и массы теплоносителя	3
Приложение А (справочное) Вывод формул для расчета погрешностей измерений тепловой энергии и массы теплоносителя	6
Приложение Б (справочное) Примеры расчета погрешностей измерений тепловой энергии и массы теплоносителя	9
Библиография	14

Государственная система обеспечения единства измерений

**ОЦЕНИВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВОЙ
ЭНЕРГИИ И МАССЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ВОДЯНЫХ
СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

State system for ensuring the uniformity of measurements. Estimation of errors of measurements of thermal energy and weight of the heat-carrier in water systems of the heat supply

Дата введения — 2012—07—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на водяные системы теплоснабжения и устанавливает методику оценивания погрешностей измерений тепловой энергии и массы теплоносителя в этих системах.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 8.642—2008 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем узлов учета тепловой энергии. Основные положения

ГОСТ Р 51649—2000 Теплосчетчики для водяных систем теплоснабжения. Общие технические условия

ГОСТ 8.009—84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений

П р и м е ч а н и е — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим ежемесячно издаваемым информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный стандарт заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться заменяющим (измененным) стандартом. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Основные термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 водяная система теплоснабжения: Система теплоснабжения, в которой в качестве теплоносителя используется вода.

3.2 тепловая энергия [количество теплоты] в водяных системах теплоснабжения: Энергия, отдаваемая теплоносителем в виде теплоты в системах водяного теплоснабжения и/или затраченная на подогрев невозвращенной сетевой воды.

3.3 узел учета тепловой энергии; УУТЭ: Комплект приборов и устройств, обеспечивающий учет тепловой энергии, массы (объема) теплоносителя, а также контроль и регистрацию других параметров теплоносителя.

3.4

закрытая водяная система теплоснабжения: Водяная система теплоснабжения, в которой вода, циркулирующая в тепловой сети, используется только как теплоноситель и из сети не отбирается.
[ГОСТ 26691—85, статья 40]

3.5 **открытая водяная система теплоснабжения:** Водяная система теплоснабжения, при которой вода частично или полностью отбирается из сети потребителями тепла.

3.6 **однотрубная система:** Полностью открытая водяная система теплоснабжения, не содержащая обратного трубопровода.

3.7 **теплосчетчик:** Средство измерений тепловой энергии, которую поглощает или отдает теплоноситель в водяных системах теплоснабжения, и параметров теплоносителя.

3.8

измерительный канал теплосчетчика: Совокупность измерительных преобразователей и/или средств измерений, линий связи, электронных (вычислительных) блоков, обеспечивающая измерение количества теплоты или других физических величин по данным об измеренных параметрах теплоносителя.
[ГОСТ Р 51649—2000, статья 3.9]

4 Общие положения

4.1 Тепловую энергию Q для водяных систем теплоснабжения определяют в соответствии с рекомендациями [1], [2], [3] и правилами [4] по следующим формулам:

Для открытых водяных систем теплоснабжения:

$$Q = \int m_1 h_1 d\tau - \int m_2 h_2 d\tau - \int m_{x.B} h_{x.B} d\tau; \quad (1)$$

$$Q = \int m_2 (h_1 - h_2) d\tau + \int (m_1 - m_2) h_1 d\tau - \int m_{x.B} h_{x.B} d\tau; \quad (2)$$

$$Q = \int m_1 (h_1 - h_2) d\tau + \int (m_1 - m_2) h_2 d\tau - \int m_{x.B} h_{x.B} d\tau; \quad (3)$$

$$Q = \int m_2 (h_1 - h_2) d\tau + \int m_3 h_1 d\tau - \int m_{x.B} h_{x.B} d\tau; \quad (4)$$

$$Q = \int m_1 (h_1 - h_2) d\tau + \int m_3 h_2 d\tau - \int m_{x.B} h_{x.B} d\tau; \quad (5)$$

$$\Delta M = \int m_1 d\tau - \int m_2 d\tau = \int (m_1 - m_2) d\tau, \quad (6)$$

где $m_1, m_2, m_3, m_{x.B}$ — массовые расходы сетевой воды в прямом, обратном трубопроводах и отбираемой в однотрубную систему горячего водоснабжения (далее — ГВС) ($m_3 = m_1 - m_2$ при отсутствии утечек), а также в однотрубной системе холодной воды ($m_{x.B} = m_1 - m_2$ при отсутствии утечек), соответственно;

τ — время;

h_1, h_2 и $h_{x.B}$ — удельные энтальпии сетевой воды в прямом, обратном трубопроводах и в однотрубной системе холодной воды, соответственно;

ΔM — масса теплоносителя, отбираемого из водяной системы теплоснабжения.

Для закрытых водяных систем теплоснабжения:

$$Q = \int m (h_1 - h_2) d\tau, \quad (7)$$

где m — массовый расход сетевой воды в прямом и обратном трубопроводах.

Для однотрубной системы:

$$Q = \int m h d\tau, \quad (8)$$

где m и h — массовый расход и энтальпия теплоносителя в трубопроводе.

4.2 Требования настоящего стандарта основаны на требованиях ГОСТ Р 51649 и ГОСТ Р 8.642.

По уровню погрешностей измерений количества теплоты, обеспечиваемых измерительным каналом, теплосчетчики в соответствии с ГОСТ Р 51649 подразделяют на классы А, В и С. Принадлежность теплосчетчиков к тому или иному классу определяют в процессе их испытаний в целях утверждения типа. В таблице 1 указаны значения погрешностей для теплосчетчиков классов А, В и С.

Т а б л и ц а 1

Класс теплосчетчика	Формула для вычисления значения пределов допускаемой относительной погрешности, %
С	$\pm (2 + 4 \Delta t_{\text{н}}/\Delta t + 0,01G_{\text{max}}/G)$
В	$\pm (3 + 4 \Delta t_{\text{н}}/\Delta t + 0,02G_{\text{max}}/G)$
А	$\pm (4 + 4 \Delta t_{\text{н}}/\Delta t + 0,05G_{\text{max}}/G)$
<p>В формулах: G_{max} — наибольшее значение расхода теплоносителя, м³/ч; G — измеряемый расход теплоносителя, м³/ч; $\Delta t_{\text{н}}$ — наименьшее значение разности температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, °С; выбирают из ряда: 1 °С, 2 °С, 3 °С для теплосчетчиков класса С; 2 °С, 3 °С, 5 °С — для теплосчетчиков класса В; 3 °С, 5 °С, 10 °С — для теплосчетчиков класса А; Δt — измеряемое значение разности температур, теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, °С.</p>	

5 Методика оценивания погрешностей измерений тепловой энергии и массы теплоносителя

5.1 В настоящем стандарте при оценивании параметров точности измерений используют погрешности измерений по ГОСТ 8.009.

Допускается проводить это оценивание с помощью неопределенностей измерений. Порядок вычисления неопределенностей и сравнительный анализ двух указанных выше подходов к выражению характеристик точности измерений представлен в рекомендациях [5].

5.2 Оценивание погрешностей измерений тепловой энергии и массы теплоносителя в УУТЭ в зависимости от схемы его построения проводят по нижеприведенным формулам (вывод формул представлен в приложении А, пример расчета — в приложении Б). При оценивании погрешностей оперируют неисключенными систематическими погрешностями измерений при доверительной вероятности 0,95.

5.2.1 Для УУТЭ с тремя расходомерами: P_1 в подводящем трубопроводе, P_2 в обратном трубопроводе и P_3 в трубопроводе ГВС — расчет тепловой энергии проводят по расходомерам P_1 и P_3 , а расходомер в обратном трубопроводе P_2 служит для контроля утечек теплоносителя, следовательно, наличие расходомера P_2 необязательно.

Доверительные границы относительной погрешности (как безразмерную величину) измерений тепловой энергии δQ вычисляют по формуле

$$\delta Q = \pm 1,1 \sqrt{\frac{(Q_1 \cdot \delta Q_1)^2 + (Q_3 \cdot \delta Q_3)^2 + (Q_{\text{х.в}} \cdot \delta Q_{\text{х.в}})^2}{Q_1 + Q_3 - Q_{\text{х.в}}}}, \quad (9)$$

$$\text{где } Q_1 = \rho_1 G_1 (h_1 - h_2); \quad (10)$$

$$Q_3 = \rho_3 G_3 h_2; \quad (11)$$

$$Q_{\text{х.в}} = \rho_{\text{х.в}} G_{\text{х.в}} h_{\text{х.в}}; \quad (12)$$

G_1 , G_3 и $G_{\text{х.в}}$ — объемные расходы теплоносителя в подающем трубопроводе, в однетрубной системе с энтальпией h_2 и в однетрубной системе холодной воды с энтальпией $h_{\text{х.в}}$, соответственно, м³/ч;

δQ_1 — пределы допускаемой относительной погрешности, %, вычисляемые по формулам таблицы 1 в зависимости от класса теплосчетчика.

Погрешность измерений δQ_1 теплосчетчика для закрытой водяной системы теплоснабжения известна. Она определена при проведении испытаний в целях утверждения типа указанного средства измерений (далее — СИ) (см. раздел 4, таблица 1) и внесении его в Госреестр средств измерений

Российской Федерации (далее — Госреестр СИ РФ). Погрешность измерений δQ_3 теплосчетчика для однотрубной системы с энтальпией h_2 определяют исходя из уравнения (11)

$$\delta Q_3 = \sqrt{\delta \rho_3^2 + \delta G_3^2 + \delta h_2^2}. \quad (13)$$

Погрешность измерений $\delta Q_{х.в}$ теплосчетчика для однотрубной системы холодной воды определяют исходя из уравнения (12)

$$\delta Q_{х.в} = \sqrt{\delta \rho_{х.в}^2 + \delta G_{х.в}^2 + \delta h_{х.в}^2}. \quad (14)$$

Значения входящих в формулы (10), (11) и (12) энтальпии h и плотности ρ теплоносителя как функции его температуры и давления либо берут из таблиц ГССД [6], [7], либо вычисляют по формулам рекомендаций [1].

Доверительные границы погрешности измерений массы теплоносителя δm_i вычисляют по формуле

$$\delta m_i = \pm 1,1 \sqrt{\delta \rho_i^2 + \delta G_i^2}, \quad (15)$$

где $i = 1, 2, 3$;

$$\delta \rho_i = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta t_i \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \Delta P_i \right)^2}. \quad (16)$$

Пределы относительной допускаемой погрешности измерений энтальпии теплоносителя вычисляют по формуле

$$\delta h_i = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial t} \Delta t_i \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial P} \Delta P_i \right)^2}. \quad (17)$$

В формулах (16) и (17):

$\partial \rho / \partial t$, $\partial \rho / \partial P$, $\partial h / \partial t$, $\partial h / \partial P$ — частные производные плотности и энтальпии теплоносителя по температуре и давлению при $t = t_i$ и $P = P_i$ (определяют путем дифференцирования уравнений для плотности и энтальпии из рекомендаций [1] или используя таблицы ГСССД [6], [7], переходя от дифференцирования к конечным разностям);

Δt_i и ΔP_i — абсолютные погрешности измерений температуры и давления теплоносителя.

5.2.2 Для УУТЭ с двумя расходомерами, в котором отсутствует расходомер P_3 и величину G_3 определяют как разность расходов в подающем и обратном трубопроводах, пределы допускаемой относительной погрешности измерений тепловой энергии δQ вычисляют по формуле

$$\delta Q = \pm 1,1 \sqrt{\frac{(Q_1 \cdot \delta Q_1)^2 + (Q_2 \cdot \delta Q_2)^2 + (Q_{х.в} \cdot \delta Q_{х.в})^2}{(Q_1 - Q_2 - Q_{х.в})}}, \quad (18)$$

где $Q_1 = \rho_1 G_1 h_1$; (19)

$Q_2 = (\rho_1 G_1 - \rho_2 G_2) h_2$; (20)

$Q_{х.в} = m_{х.в} h_{х.в} = \rho_{х.в} G_{х.в} h_{х.в}$; (21)

δQ_1 — пределы допускаемой относительной погрешности, %, вычисляют по формулам таблицы 1 в зависимости от класса теплосчетчика:

$$\delta Q_2 = \pm \sqrt{\frac{(\rho_1 G_1 \sqrt{\delta \rho_1^2 + \delta G_1^2})^2 + (\rho_2 G_2 \sqrt{\delta \rho_2^2 + \delta G_2^2})^2}{(\rho_1 G_1 - \rho_2 G_2)^2}} + \delta h_2^2; \quad (22)$$

$$\delta Q_{x,B} = \pm \sqrt{(\delta \rho_{x,B})^2 + (\delta G_{x,B})^2 + (\delta h_{x,B})^2}. \quad (23)$$

Доверительные границы погрешности измерений массы теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах вычисляют по формуле (15), где $i = 1, 2$.

Доверительные границы погрешности измерений массы δm_3 теплоносителя, отбираемого в трубопровод ГВС, определяют по формуле

$$\delta m_3 = \pm 1,1 \sqrt{\delta \rho_3^2 + \frac{(G_1 \cdot \delta G_1)^2 + (G_2 \cdot \delta G_2)^2}{(G_1 - G_2)^2}}. \quad (24)$$

Приложение А
(справочное)

**Вывод формул для расчета погрешностей измерений тепловой энергии
и массы теплоносителя**

А.1 Узел учета тепловой энергии с тремя расходомерами

Приведенные в разделе 4 формулы (1)—(5) для определения тепловой энергии для открытой водяной системы теплоснабжения адекватны друг другу и представляют собой модификации уравнения (1). Применение того или иного уравнения зависит от конкретной организации измерений в УУТЭ.

Уравнение (5) при конечном временном интервале для тепловой энергии Q имеет вид:

$$Q = m_1(h_1 - h_2) + m_3h_2 - m_{x,b}h_{x,b}. \quad (\text{A.1})$$

Это уравнение описывает УУТЭ с тремя расходомерами: в подводящем трубопроводе — P_1 , в обратном трубопроводе — P_2 и в трубопроводе ГВС — P_3 . Причем расчет тепловой энергии проводят по расходомерам P_1 и P_3 , а расходомер в обратном трубопроводе P_2 служит для контроля утечек теплоносителя. Значения энтальпии холодной воды (как правило, среднее за месяц) сообщает поставщик тепловой энергии.

Правая часть уравнения (А.1) может быть представлена слагаемой из трех частей:

$$Q_1 = m_1(h_1 - h_2) = \rho_1 G_1(h_1 - h_2); \quad (\text{A.2})$$

$$Q_3 = m_3h_2 = \rho_3 G_3h_2; \quad (\text{A.3})$$

$$Q_{x,b} = m_{x,b}h_{x,b} = \rho_{x,b} G_{x,b}h_{x,b}; \quad (\text{A.4})$$

$$Q = Q_1 + Q_3 - Q_{x,b}. \quad (\text{A.5})$$

Очевидно, что Q_1 эквивалентна тепловой энергии для закрытой системы водяного теплоснабжения при расходе теплоносителя m_1 и энтальпии на подающем и обратном трубопроводах h_1 и h_2 , соответственно; Q_3 эквивалентна тепловой энергии для однотрубной системы (трубопровода ГВС) при расходе теплоносителя m_3 и энтальпии h_2 , а $Q_{x,b}$ эквивалентна тепловой энергии для однотрубной системы холодной воды при расходе теплоносителя $m_{x,b}$ и энтальпии $h_{x,b}$.

Отсюда следует, что теплосчетчик в открытой системе водяного теплоснабжения виртуально может быть представлен как совокупность трех теплосчетчиков: для закрытой системы водяного теплоснабжения, для однотрубной системы ГВС и однотрубной системы холодной воды.

Исходя из изложенного выше следует, что абсолютная погрешность измерений тепловой энергии ΔQ теплосчетчика для открытой системы

$$\Delta Q = \pm 1,1 \sqrt{\Delta Q_1^2 + \Delta Q_3^2 + \Delta Q_{x,b}^2}. \quad (\text{A.6})$$

Доверительные границы погрешности измерений тепловой энергии δQ вычисляют по формуле

$$\delta Q = \pm 1,1 \frac{\sqrt{(Q_1 \cdot \delta Q_1)^2 + (Q_3 \cdot \delta Q_3)^2 + (Q_{x,b} \cdot \delta Q_{x,b})^2}}{Q_1 + Q_3 - Q_{x,b}}, \quad (\text{A.7})$$

где δQ_1 — пределы допускаемой относительной погрешности измерений тепловой энергии с помощью теплосчетчика для закрытой водяной системы теплоснабжения;

δQ_3 — пределы допускаемой относительной погрешности измерений тепловой энергии с помощью теплосчетчика для однотрубной системы (трубопровода ГВС);

$\delta Q_{x,b}$ — пределы допускаемой относительной погрешности измерений тепловой энергии с помощью теплосчетчика для однотрубной системы холодной воды.

Погрешность измерений δQ_1 теплосчетчика для закрытого контура известна. Она определена при проведении испытаний в целях утверждения типа СИ и внесении его в Госреестр СИ РФ (см. таблицу 1).

Доверительные границы погрешности измерений δQ_3 для однотрубной системы (трубопровода ГВС) определяют исходя из уравнения (А.3)

$$\delta Q_3 = \sqrt{(\delta \rho_3)^2 + (\delta G_3)^2 + (\delta h_2)^2}. \quad (\text{A.8})$$

Доверительные границы погрешности измерений $\delta Q_{x,b}$ для однотрубной системы холодной воды определяют исходя из уравнения (А.4)

$$\delta Q_{x,в} = \sqrt{(\rho \delta_{x,в})^2 + (\delta G_{x,в})^2 + (\delta h_{x,в})^2}. \quad (\text{A.9})$$

А.2 Узел учета тепловой энергии с двумя расходомерами

Для УУТЭ, в котором отсутствует расходомер P_3 и величину m_3 определяют как разность расходов в подающем и обратном трубопроводах, следует воспользоваться уравнением (3), которое при конечном временном интервале имеет вид:

$$Q = m_1(h_1 - h_2) + (m_1 - m_2)h_2 - m_{x,в}h_{x,в}. \quad (\text{A.10})$$

Правая часть уравнения (A.10) может быть представлена слагаемой из трех частей:

$$Q_1 = m_1(h_1 - h_2) = \rho_1 G_1(h_1 - h_2); \quad (\text{A.11})$$

$$Q_2 = (m_1 - m_2)h_2 = (\rho_1 G_1 - \rho_2 G_2)h_2; \quad (\text{A.12})$$

$$Q_{x,в} = m_{x,в}h_{x,в} = \rho_{x,в} G_{x,в} h_{x,в}; \quad (\text{A.13})$$

$$Q = Q_1 + Q_2 - Q_{x,в}. \quad (\text{A.14})$$

Очевидно, что Q_1 эквивалентна тепловой энергии для закрытой системы водяного теплоснабжения при массе теплоносителя m_1 и энтальпии на подающем и обратном трубопроводах h_1 и h_2 , соответственно, Q_2 эквивалентна тепловой энергии для однотрубной системы при массе теплоносителя $(m_1 - m_2)$ и энтальпии h_2 , а $Q_{x,в}$ эквивалентна тепловой энергии для однотрубной системы холодной воды при расходе теплоносителя $m_{x,в}$ и энтальпии $h_{x,в}$.

Тогда доверительные границы погрешности измерений тепловой энергии δQ вычисляют по формуле

$$\delta Q = \pm 1,1 \frac{\sqrt{(Q_1 \cdot \delta Q_1)^2 + (Q_2 \cdot \delta Q_2)^2 + (Q_{x,в} \cdot \delta Q_{x,в})^2}}{Q_1 + Q_2 - Q_{x,в}}, \quad (\text{A.15})$$

где δQ_1 — берут из таблицы 1 в зависимости от класса теплосчетчика;

$$\delta Q_2 = \pm \sqrt{\frac{(\rho_1 G_1 \sqrt{\delta \rho_1^2 + \delta G_1^2})^2 + (\rho_2 G_2 \sqrt{\delta \rho_2^2 + \delta G_2^2})^2}{(\rho_1 G_1 - \rho_2 G_2)^2}} + \delta h_2^2; \quad (\text{A.16})$$

$$\delta Q_{x,в} = \pm \sqrt{(\delta \rho_{x,в})^2 + (\delta G_{x,в})^2 + (\delta h_{x,в})^2}. \quad (\text{A.17})$$

А.3 Расчет погрешностей измерений массы теплоносителя

Расчет погрешностей измерений массы теплоносителя с помощью теплосчетчиков, в состав которых входят объемные расходомеры, проводят следующим образом.

В случае применения трех расходомеров массу теплоносителя: m_1 , поступающую в единицу времени по подающему трубопроводу, m_2 , уходящую по обратному трубопроводу, и m_3 , уходящую из открытой водяной системы теплоснабжения на нужды ГВС, определяют по формуле

$$m_i = \rho_i G_i, \quad (\text{A.18})$$

где $i = 1, 2, 3$;

ρ_i и G_i — плотность теплоносителя и его объемный расход в i -м трубопроводе.

Доверительные границы погрешности измерений массы теплоносителя вычисляют по формуле

$$\delta m_i = \pm 1,1 \sqrt{\delta \rho_i^2 + \delta G_i^2}, \quad (\text{A.19})$$

$$\text{где } \delta \rho_i = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta t_i\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \Delta P_i\right)^2}. \quad (\text{A.20})$$

В формуле (A.20):

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$, $\frac{\partial \rho}{\partial P}$ — частные производные плотности по температуре и давлению теплоносителя при $t = t_i$ и $P = P_i$ (определяют, используя таблицы ГССД [6], [7], переходя от дифференцирования к конечным разностям);

Δt_i и ΔP_i — абсолютные погрешности измерений температуры и давления теплоносителя.

ГОСТ Р 8.728—2010

В случае применения двух расходомеров доверительные границы погрешности измерений массы теплоносителя, поступающей в единицу времени по подводящему трубопроводу δm_1 и уходящей по обратному трубопроводу δm_2 , определяют по формуле (А.19).

Доверительные границы погрешности измерений массы m_3 теплоносителя, уходящей из открытой водяной системы теплоснабжения на нужды ГВС, определяют исходя из того, что $m_3 = m_1 - m_2$:

$$\delta m_3 = \pm 1,1 \frac{\sqrt{(m_1 \cdot \delta m_1)^2 + (m_2 \cdot \delta m_2)^2}}{m_1 - m_2}. \quad (\text{A.21})$$

**Приложение Б
(справочное)**

Примеры расчета погрешностей измерений тепловой энергии и массы теплоносителя

Б.1 Узел учета тепловой энергии с тремя расходомерами

Расчет погрешностей измерений тепловой энергии и массы теплоносителя проведен для УУТЭ, на котором установлен теплосчетчик ТСК8 с тремя расходомерами: P_1 , P_2 и P_3 . Условный диаметр D_u трубопровода равен 50 мм.

Теплосчетчик ТСК8 относится к классу С по ГОСТ Р 51649 и включает в себя расходомеры типа ПРЭМ (17858-06)/Э), термометры типа КТПТР (14638-05) и преобразователи давления типа ПД (28697-05).

Примечание — В скобках указаны номера СИ в Госреестре СИ РФ.

Метрологические характеристики теплосчетчика для $D_u = 50$ мм следующие:

- наибольшее измеряемое значение расхода G_{max} 72 м³/ч;
 - наименьшее измеряемое значение расхода $G_{min} = G_{max}/100$ 0,72 м³/ч;
 - нижний предел диапазона разности температур $\Delta t_{н}$ 3 °С;
 - пределы допускаемой относительной погрешности преобразователя расхода δG ± 1 %;
 - пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры Δt $\pm (0,15 + 0,001t)$ °С;
 - пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений разности температур (Δt), равные $\Delta (\Delta t)$ $\pm (0,05 + 0,001t)$ °С;
 - пределы допускаемой относительной погрешности измерений давления ΔP ± 1 %.
- Типовой тепловой режим на УУТЭ следующий:

- подающий трубопровод $G_1 = 10$ м³/ч; $t_1 = 90$ °С;
 - обратный трубопровод $G_2 = 9$ м³/ч; $t_2 = 60$ °С;
 - однотрубная система ГВС. $G_3 = 1,0$ м³/ч; $t_3 = 70$ °С;
 - давление теплоносителя в подающем трубопроводе $P_1 = 8$ кгс/см²;
 - давление теплоносителя в обратном трубопроводе $P_2 = 4$ кгс/см².
- Параметры холодной воды следующие (их значения сообщает поставщик тепловой энергии):
- расход холодной воды (при отсутствии утечек теплоносителя равен расходу ГВС). $G_{х.в} = 1,0$ м³/ч;
 - температура холодной воды $t_{х.в} = 5$ °С;
 - пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры холодной воды $\Delta t_{х.в}$ $\pm (0,15 + 0,001t_{х.в})$ °С;
 - давление холодной воды $P_{х.в}$ 8 кгс/см².
- Доверительные границы погрешности измерений тепловой энергии δQ вычисляют по формуле (9)

$$\delta Q = \pm 1,1 \frac{\sqrt{(Q_1 \cdot \delta Q_1)^2 + (Q_3 \cdot \delta Q_3)^2 + (Q_{х.в} \cdot \delta Q_{х.в})^2}}{Q_1 + Q_3 - Q_{х.в}},$$

где $Q_1 = \rho_1 G_1 (h_1 - h_2) = 965,64 \cdot 10 \cdot (90,17 - 60,06) = 2,906 \cdot 10^5$ ккал/ч;

$Q_3 = \rho_3 G_3 h_2 = 977,90 \cdot 1,0 \cdot 60,06 = 0,5873 \cdot 10^5$ ккал/ч;

$Q_{х.в} = \rho_{х.в} G_{х.в} h_{х.в} = 1000,30 \cdot 1,0 \cdot 5,207 = 0,05208 \cdot 10^5$ ккал/ч.

При отсутствии утечек $G_3 = G_{х.в}$.

Для теплосчетчика класса С значения пределов допускаемой относительной погрешности δQ_1 , %, для закрытой водяной системы теплоснабжения определяют в соответствии с формулой по таблице 1:

$$\delta Q_1 = \pm (2 + 4 \cdot \frac{3}{30} + 0,01 \cdot \frac{72}{10}) = \pm 2,47 \%;$$

$$\delta Q_3 = \pm \sqrt{(\delta \rho_3)^2 + (\delta G_3)^2 + (\delta h_2)^2};$$

$$\delta Q_{х.в} = \pm \sqrt{(\delta \rho_{х.в})^2 + (\delta G_{х.в})^2 + (\delta h_{х.в})^2}.$$

Вычисляют $\delta\rho_3$, $\Delta\rho_{x,в}$, δh_2 и $\Delta h_{x,в}$ с учетом того, что ρ и h представляют собой функции температуры и давления

$$\delta\rho_3 = \pm \sqrt{\left(\frac{\frac{\partial\rho}{\partial t} \Delta t_3}{\rho_3}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\partial\rho}{\partial P} \Delta P_3}{\rho_3}\right)^2}.$$

При $t = t_3 = 70$ °С и $P = P_3 = 4$ кгс/см², используя таблицы ГССД, находят:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = \frac{\rho(70) - \rho(69)}{70 - 69} = \frac{977,90 - 978,47}{70 - 69} = -0,43 \text{ кгс}/(\text{м}^3 \cdot \text{°С});$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial P} = \frac{\rho(4) - \rho(3)}{4 - 3} = \frac{977,90 - 977,86}{4 - 3} = 0,04 \text{ кгс}/(\text{м}^3 \cdot \text{кгс}/\text{см}^2);$$

$$\Delta t_3 = \pm (0,15 + 0,001 \cdot 70) = \pm 0,22 \text{ °С};$$

$$\Delta P_i = \pm 0,01 \cdot 4 = \pm 0,04 \text{ кгс}/\text{см}^2;$$

$$\delta\rho_3 = \pm \sqrt{\left(\frac{-0,43 \cdot 0,22}{977,90}\right)^2 + \left(\frac{0,04 \cdot 0,04}{977,90}\right)^2} = \pm 0,983 \cdot 10^{-4} \approx \pm 0,0098 \text{ %};$$

$$\Delta\rho_{x,в} = \pm \sqrt{\left(\frac{\frac{\partial\rho}{\partial t} \Delta t_{x,в}}{\rho_{x,в}}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\partial\rho}{\partial P} \Delta P_{x,в}}{\rho_{x,в}}\right)^2}.$$

При $t = t_{x,в} = 5$ °С и $P = P_3 = 8$ кгс/см², используя таблицы ГССД, находят:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = \frac{\rho(5) - \rho(4)}{5 - 4} = \frac{1000,30 - 1000,31}{5 - 4} = -0,01 \text{ кгс}/(\text{м}^3 \cdot \text{°С});$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial P} = \frac{\rho(8) - \rho(7)}{8 - 7} = \frac{1000,30 - 1000,25}{8 - 7} = 0,05 \text{ кгс}/(\text{м}^3 \cdot \text{кгс}/\text{см}^2);$$

$$\Delta t_{x,в} = \pm (0,15 + 0,001 \cdot 5) = \pm 0,155 \text{ °С};$$

$$\Delta P_{x,в} = \pm 0,01 \cdot 8 = 0,08 \text{ кгс}/\text{см}^2;$$

$$\Delta\rho_{x,в} = \pm \sqrt{\left(\frac{-0,01 \cdot 0,155}{1000,30}\right)^2 + \left(\frac{0,05 \cdot 0,08}{1000,30}\right)^2} = \pm 4,3 \cdot 10^{-6} \approx 0,0004 \text{ %};$$

$$\delta h_2 = \pm \sqrt{\left(\frac{\frac{\partial h}{\partial t} \Delta t_2}{h_2}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\partial h}{\partial P} \Delta P_3}{h_2}\right)^2}.$$

При $t = t_2 = 60$ °С и $P = P_3 = 4$ кгс/см², используя таблицы ГССД, находят:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h(60) - h(59)}{70 - 69} = \frac{60,06 - 59,06}{60 - 59} = 1,0 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{°С});$$

$$\frac{\partial h}{\partial P} = \frac{h(4) - h(3)}{4 - 3} = \frac{60,06 - 60,04}{4 - 3} = 0,02 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{кгс}/\text{см}^2);$$

$$\Delta t_2 = \pm (0,15 + 0,001 \cdot 60) = \pm 0,21 \text{ °С};$$

$$\Delta P_i = \pm 0,01 \cdot 4 = \pm 0,04 \text{ кгс}/\text{см}^2;$$

$$\delta h_2 = \pm \sqrt{\left(\frac{1,0 \cdot 0,21}{60,06}\right)^2 + \left(\frac{0,02 \cdot 0,04}{60,06}\right)^2} = \pm 0,00349 \approx 0,35 \text{ %};$$

$$\delta h_{x,B} = \pm \sqrt{\left(\frac{\frac{\partial h}{\partial t} \Delta t_{x,B}}{h_{x,B}}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\partial h}{\partial P} \Delta P_{x,B}}{h_{x,B}}\right)^2}.$$

При $t = t_{x,B} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $P = P_3 = 8 \text{ кгс/см}^2$, используя таблицы ГССД [6], [7], находят:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h(5) - h(4)}{5 - 4} = \frac{5,207 - 4,203}{5 - 4} = 1,004 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$\frac{\partial h}{\partial P} = \frac{h(8) - h(7)}{8 - 7} = \frac{5,207 - 5,183}{8 - 7} = 0,024 \text{ кгс/(м}^3 \cdot \text{кгс/см}^2);$$

$$\Delta t_{x,B} = \pm (0,15 + 0,001 \cdot 5) = \pm 0,155 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta P_{x,B} = \pm 0,01 \cdot 8 = 0,08 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\delta h_{x,B} = \pm \sqrt{\left(\frac{1,004 \cdot 0,155}{5,207}\right)^2 + \left(\frac{0,024 \cdot 0,08}{5,207}\right)^2} = \pm 2,98 \cdot 10^{-6} \approx \pm 3,0 \text{ } \%$$

Очевидно, что при вычислении погрешностей δQ_3 и $\delta Q_{x,B}$ допускается пренебречь погрешностями $\delta \rho_3$ и $\delta \rho_{x,B}$ из-за их малости. Тогда:

$$\delta Q_3 = \pm \sqrt{(\delta G_3)^2 + (\delta h_2)^2} = \sqrt{(1)^2 + (0,35)^2} = \pm 1,05 \text{ } \% \approx \pm 1 \text{ } \%$$

$$\delta Q_{x,B} = \pm \sqrt{(\delta G_{x,B})^2 + (\delta h_{x,B})^2} = \sqrt{(1)^2 + (3)^2} = \pm 3,162 \text{ } \% \approx \pm 3,2 \text{ } \%$$

Получают следующее значение доверительных границ погрешности измерений тепловой энергии δQ :

$$\begin{aligned} \delta Q &= \pm 1,1 \frac{\sqrt{(Q_1 \cdot \delta Q_1)^2 + (Q_3 \cdot \delta Q_3)^2 + (Q_{x,B} \cdot \delta Q_{x,B})^2}}{Q_1 + Q_3 - Q_{x,B}} = \\ &= \frac{1,1 \sqrt{(2,906 \cdot 10^5 \cdot 0,0247)^2 + (0,5873 \cdot 10^5 \cdot 0,01)^2 + (0,05208 \cdot 10^5 \cdot 0,032)^2}}{2,906 \cdot 10^5 + 0,5873 \cdot 10^5 - 0,05208 \cdot 10^5} = \pm 0,0224 \approx \pm 2,2 \text{ } \%. \end{aligned}$$

Для примера вычисляют доверительные границы погрешности измерений массы теплоносителя, уходящего по трубопроводу ГВС.

Используя формулу (А.19) для массы m_3 , получают:

$$\Delta m_3 = \pm 1,1 \sqrt{\delta \rho_3^2 + \delta G_3^2};$$

$$\delta G_3 = \pm 1 \text{ } \%;$$

$$\delta \rho_3 = \pm \sqrt{\left(\frac{\frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta t_i}{\rho_3}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\partial \rho}{\partial P} \Delta P_i}{\rho_i}\right)^2}.$$

При $t = t_3 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и $P = P_3 = 4 \text{ кгс/см}^2$, используя таблицы ГССД, находят:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho(70,4) - \rho(69,4)}{70 - 69} = \frac{977,90 - 978,47}{70 - 69} = -0,43 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{\rho(70,4) - \rho(70,3)}{4 - 3} = \frac{977,90 - 977,86}{4 - 3} = 0,04 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{кгс/см}^2);$$

$$\Delta t_3 = \pm (0,15 + 0,001 \cdot 70) = \pm 0,22 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta P_i = \pm 0,01 \cdot 4 = 0,04 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\delta\rho_3 = \pm \sqrt{\left(\frac{-0,51 \cdot 0,22}{977,90}\right)^2 + \left(\frac{0,04 \cdot 0,04}{977,90}\right)^2} = \pm 1,15 \cdot 10^{-4} \approx \pm 0,015 \%$$

Эту погрешность из-за ее малости допускается не учитывать, тогда пределы относительной допускаемой погрешности измерений массы теплоносителя

$$\delta m_3 = \pm \delta G_3 = \pm 1 \%$$

Б.2 Узел учета тепловой энергии с двумя расходомерами

Расчет погрешностей измерений тепловой энергии и массы теплоносителя проведен для УУТЭ, в котором установлен теплосчетчик ТСК8 с двумя расходомерами: P_1 и P_2 . Метрологические характеристики СИ и тепловой режим те же, что в разделе Б.1.

Тогда доверительные границы погрешности измерений тепловой энергии δQ вычисляют по формуле

$$\delta Q = \pm 1,1 \frac{\sqrt{(Q_1 \cdot \delta Q_1)^2 + (Q_2 \cdot \delta Q_2)^2 + (Q_{x,B} \cdot \delta Q_{x,B})^2}}{Q_1 + Q_2 - Q_{x,B}},$$

где $Q_1 = \rho_1 G_1 (h_1 - h_2) = 965,64 \cdot 10 \cdot (90,17 - 60,06) = 2,906 \cdot 10^5$ ккал/ч;

$$Q_2 = (m_1 - m_2)h_2 = (\rho_1 G_1 - \rho_2 G_2)h_2 = (965,64 \cdot 10,0 - 983,50 \cdot 9,0) \cdot 60,13 = 0,4840 \cdot 10^5 \text{ ккал/ч};$$

$$Q_{x,B} = \rho_{x,B} G_{x,B} h_{x,B} = 1000,30 \cdot 1,0 \cdot 5,207 = 0,05208 \cdot 10^5 \text{ ккал/ч};$$

$$\delta Q_1 = \pm \left(2 + 4 \cdot \frac{3}{30} + 0,01 \cdot \frac{72}{10}\right) = \pm 2,47 \% \text{ (берут из таблицы 1);}$$

$$\delta Q_2 = \pm \sqrt{\frac{\left(\rho_1 G_1 \sqrt{\delta \rho_1^2 + \delta G_1^2}\right)^2 + \left(\rho_2 G_2 \sqrt{\delta \rho_2^2 + \delta G_2^2}\right)^2}{(\rho_1 G_1 - \rho_2 G_2)^2} + \delta h_2^2};$$

$$\delta Q_{x,B} = \pm \sqrt{(\delta G_{x,B})^2 + (\delta h_{x,B})^2}.$$

Вычисляют δh_2 , входящее в формулу для δQ_2 ,

$$\delta h_2 = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial t} \Delta t_2}{h_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial P} \Delta P_2}{h_2}\right)^2}.$$

При $t = t_2 = 60$ °С и $P = P_2 = 4$ кгс/см², используя таблицы ГССД, находят:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h(60) - h(59)}{60 - 59} = \frac{60,06 - 59,06}{60 - 59} = 1,0 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{°С)};$$

$$\frac{\partial h}{\partial P} = \frac{\rho(4) - \rho(3)}{4 - 3} = \frac{60,06 - 60,04}{4 - 3} = 0,02 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{кгс/см}^2\text{)};$$

$$\Delta t_2 = \pm (0,15 + 0,001 \cdot 60) = \pm 0,21 \text{ °С};$$

$$\Delta P_2 = \pm 0,01 \cdot 4 = \pm 0,04 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\Delta h_2 = \pm \sqrt{\left(\frac{1,0 \cdot 0,21}{60,06}\right)^2 + \left(\frac{0,02 \cdot 0,04}{60,06}\right)^2} = \pm 0,00359 \approx \pm 0,036 \%$$

Тогда пренебрегая, как и ранее $\delta \rho_1$ и $\delta \rho_2$, и взяв из таблиц ГССД значения $\rho_1 = 965,64$ кг/м³ и $\rho_2 = 983,33$ кг/м³, получают:

$$\begin{aligned} \delta Q_2 &= \pm \sqrt{\frac{\left(\rho_1 G_1 \sqrt{\delta \rho_1^2 + \delta G_1^2}\right)^2 + \left(\rho_2 G_2 \sqrt{\delta \rho_2^2 + \delta G_2^2}\right)^2}{(\rho_1 G_1 - \rho_2 G_2)^2} + \delta h_2^2} = \\ &= \pm \sqrt{\frac{\left(965,64 \cdot 10 \cdot \sqrt{0,01^2}\right)^2 + \left(983,33 \cdot 9 \cdot \sqrt{0,01^2}\right)^2}{(965,4 \cdot 10 - 983,33 \cdot 9)^2} + (0,0036)^2} = \pm 0,1638 \approx \pm 16,38 \%. \end{aligned}$$

При вычислении $\delta Q_{x,B}$, как и ранее, допускается пренебречь величиной $\delta \rho_{x,B}$ и положить, что $G_{x,B} = G_1 - G_2 = 10 - 9 = 1$ (это справедливо при отсутствии утечек в системе). Тогда

$$\delta G_{x,B} = \pm \frac{\sqrt{(G_1 \cdot \delta G_1)^2 + (G_2 \cdot \delta G_2)^2}}{G_1 - G_2} = \pm \frac{\sqrt{(10 \cdot 0,01)^2 + (9 \cdot 0,01)^2}}{10 - 9} = \pm 0,134 \approx \pm 13,4 \%$$

Как вычислено выше, $\delta h_{x,B} \approx \pm 3,0 \%$.

$$\delta Q_{x,B} = \pm \sqrt{(\delta \rho_{x,B})^2 + (\delta G_{x,B})^2 + (\delta h_{x,B})^2} \approx \pm \sqrt{(\delta G_{x,B})^2 + (\delta h_{x,B})^2} = \pm \sqrt{(13,4)^2 + (3,0)^2} = \pm 13,7 \%$$

Вычисляют доверительные границы погрешности измерений тепловой энергии δQ для УУТЭ с двумя расходомерами.

$$\begin{aligned} \delta Q &= \pm 1,1 \frac{\sqrt{(Q_1 \cdot \delta Q_1)^2 + (Q_2 \cdot \delta Q_2)^2 + (Q_{x,B} \cdot \delta Q_{x,B})^2}}{Q_1 + Q_2 - Q_{x,B}} = \\ &= \pm 1,1 \frac{\sqrt{(2,906 \cdot 10^5 \cdot 0,0247)^2 + (0,4840 \cdot 10^5 \cdot 0,1638)^2 + (0,05208 \cdot 10^5 \cdot 0,137)^2}}{2,906 \cdot 10^5 + 0,4840 \cdot 10^5 - 0,05208 \cdot 10^5} = \pm 0,0353 \approx \pm 3,5 \%. \end{aligned}$$

Для примера приведено вычисление доверительных границ погрешности измерений массы теплоносителя, отобранного в однотрубную систему ГВС.

Используют формулу (24)

$$\delta m_3 = \pm 1,1 \sqrt{\delta \rho_3^2 + \frac{(G_1 \cdot \delta G_1)^2 + (G_2 \cdot \delta G_2)^2}{(G_1 - G_2)^2}},$$

которая в случае пренебрежения погрешностью $\delta \rho_3$ имеет вид:

$$\delta m_3 = \pm 1,1 \sqrt{\frac{(G_1 \cdot \delta G_1)^2 + (G_2 \cdot \delta G_2)^2}{(G_1 - G_2)^2}};$$

$$\delta G_1 = \delta G_2 = \pm 1 \%; G_1 = 10 \text{ м}^3/\text{ч}; G_2 = 9,0 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Тогда

$$\delta m_3 = \pm 1,1 \frac{\sqrt{(10 \cdot 1)^2 + (9 \cdot 1)^2}}{10 - 9} = \pm 13,5 \%$$

Библиография

- [1] Рекомендации по метрологии
МИ 2412—97
Государственная система обеспечения единства измерений. Водяные системы теплоснабжения. Уравнения измерения тепловой энергии и теплоносителя
- [2] Рекомендации по метрологии
МИ 2553—99
Государственная система обеспечения единства измерений. Энергия тепловая и теплоноситель в системах теплоснабжения. Методика оценивания погрешности измерений. Основные положения
- [3] Рекомендации по метрологии
МИ 2537—2000
Государственная система обеспечения единства измерений. Тепловая энергия открытых водяных систем теплоснабжения, полученная потребителем. Методика выполнения измерений. Общие положения
- [4] Правила учета тепловой энергии и теплоносителя. — М.: 1995
- [5] Рекомендации по межгосударственной стандартизации
РМГ 43—2001
Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений»
- [6] Госстандарт России. ГСССД
Плотность, энтальпия и вязкость воды. — М.: Изд-во ВНИИЦ СМВ, 1993
- [7] ГСССД 187—99
Приняты МГС под номером 98—2000
Вода. Удельный объем и энтальпия при температурах 0 °С ...1000 °С и давлениях 0,001...1000 МПа. — Минск, 2000

УДК 389.14.089.6:006.354

ОКС 17.020

Т84.1

Ключевые слова: водяные системы теплоснабжения, узел учета, тепловая энергия, масса теплоносителя, погрешности измерений, теплосчетчик
