

13. Тараненко Ю. К. Автоколебательная система вибро-частотного измерителя плотности жидкости с механическим резонатором // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. 2006. Т. 49. № 12. С. 29–45.

14. Тараненко Ю. К. Градування та повірка поточних

віб्रो-частотних вимірювачів щільності з диференціальним датчиком // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2007. Т. 2/2. № 26. С. 41–47.

Дата прийняття: 16.11.2017.

519.233.5:532.57

## Выбор оптимального соотношения погрешностей расходомеров для повышения точности косвенных измерений разности расходов

В. П. ЧИПУЛИС

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия, e-mail: chipulis@dvo.ru

*Исследована возможность повышения точности косвенных измерений разности расходов теплоносителя в результате выбора расходомеров, погрешности которых находятся в определённом соотношении. Приведены рекомендации по выбору оптимального соотношения погрешностей расходомеров.*

**Ключевые слова:** погрешность измерений, косвенные измерения, степень открытости системы, расход теплоносителя.

*The possibility of improving the accuracy of indirect measurements of the difference in costs due to the choice of flow meters with errors, the values of which are in a certain ratio. Provides recommendations for selection of the optimal ratio of errors of the flow meters.*

**Key words:** the accuracy of measurement, indirect measurement, the degree of openness of the system, heating medium consumption.

Одна из основных проблем, с которой сталкиваются при решении задач коммерческого и технологического учёта в теплоэнергетике, связана с обеспечением достоверности результатов измерений. Главной причиной получения недостоверных результатов принято считать погрешности измерительных приборов. Однако даже соблюдение «Правил учёта тепловой энергии и теплоносителя» (Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 17 марта 2014 г. № 99/пр «Об утверждении Методики осуществления коммерческого учёта тепловой энергии, теплоносителя») в части допустимых погрешностей датчиков расхода, температуры и давления не является достаточным условием получения достоверных результатов при вычислении потребляемых ресурсов – тепловой энергии и горячей воды. Это является следствием применяемых в коммерческом учёте косвенных измерений искомых параметров с использованием значений параметров, измеренных непосредственно.

На практике наиболее проблемными являются косвенные измерения разности расходов теплоносителя. Известно, что погрешность стандартного метода косвенных измерений разности расходов двух расходомеров, установленных в подающем и обратном трубопроводах системы, зачастую достигает десятков, сотен и более процентов [1, 2]. Однако

иногда косвенный метод измерения водоразбора является единственно возможным, в частности, при измерениях расхода теплоносителя в циркуляционных системах горячего водоснабжения.

С целью повышения точности косвенных измерений в [3] предложен альтернативный стандартному дифференциальный метод измерения разности расходов. Суть метода состоит в поочерёдном измерении расходов двумя расходомерами в подающем и обратном трубопроводах системы. Безусловным достоинством дифференциального метода является то, что погрешность измерения разности расходов равна среднему арифметическому погрешностей расходомеров, т. е. не превышает максимальную (по модулю) погрешность расходомеров. Однако в ряде случаев погрешность дифференциального метода может превышать погрешность стандартного метода. Кроме того, реализация дифференциального метода весьма дорогостояща и его использование экономически оправдано в основном на крупных объектах теплоэнергетики.

В [4] предложен другой метод, направленный на повышение точности косвенных измерений разности расходов стандартным методом (при определении потребления горячей воды). Метод позволяет практически исключить влияние

разности инструментальных погрешностей расходомеров на результат измерений. Однако применение метода ограничено такими объектами, в которых не потребляют или почти не потребляют горячую воду в определённый период времени (жилые дома, учреждения, не работающие в ночную смену).

В [5] выполнен сравнительный анализ погрешностей двух методов косвенных измерений разности расходов теплоносителей. Настоящая статья является развитием работы [5], ориентированным на выбор расходомеров с определённым соотношением их погрешностей.

**Погрешности измерения разности расходов стандартным и дифференциальным методами.** Обозначим через  $r$  относительную погрешность расходомера, выраженную в долях ( $r = (M - A)/A$ , где  $A$  – фактическое значение измеренного массового расхода  $M$ ),  $p$  – относительную погрешность в процентах ( $p = 100r$ ). На рис. 1 условно изображена открытая система теплоснабжения, в которой измерения выполняются стандартным методом. Здесь  $A, B$  – фактические значения, а  $M_1, M_2$  – измеренные значения расходов теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах системы, соответственно. Для простоты последующих рассуждений положим, что в период измерений постоянны расходы  $A, B$ , погрешности расходомеров и, следовательно, измеренные значения расходов  $M_1, M_2$ .

В [5] приведены и обоснованы выражения для определения погрешности измерения разности расходов дифференциальным  $\delta_{\text{диф}}$  и стандартным  $\delta_{\text{ст}}$  методами:

$$\delta_{\text{диф}} = 0,5(p_1 + p_2); \quad (1)$$

$$\delta_{\text{ст}} = (p_1 A - p_2 B) / (A - B). \quad (2)$$

**Замечание.** Согласно «Правилам учёта тепловой энергии и теплоносителя» относительная максимально допускаемая погрешность  $\delta_{\text{max}}$  датчика расхода, выраженная в процентах в зависимости от расхода  $M$ , для расходомеров классов 1, 2, соответственно, составляет

$$\delta_{\text{max}} = \pm(1 + 0,02M_{\text{max}}/M), \text{ но не более } \pm 3,5 \%;$$

$$\delta_{\text{max}} = \pm(2 + 0,02M_{\text{max}}/M), \text{ но не более } \pm 5 \%.$$

При сложившейся практике коммерческого учёта тепловой энергии и теплоносителя допускается использование приборов класса 2. Однако при этом специалисты теплоснабжающих предприятий, как правило, полагают, что расход в рабочей области измерений может достигать  $M_{\text{max}}$ , т. е.  $M_{\text{max}}/M = 1$ . В этом случае максимально допустимая погрешность расходомеров  $\delta_{\text{max}} = \pm(2,00 + 0,02)$ . Пренебрегая долями процентов, можно принимать (что и делается на практике) погрешность расходомеров не более 2 %. Отметим, что далее максимально допустимая погрешность используется в примерах для облегчения понимания излагаемого материала. Изменение этого значения никак не влияет на основные выводы работы, связанные с выбором погрешностей расходомеров для

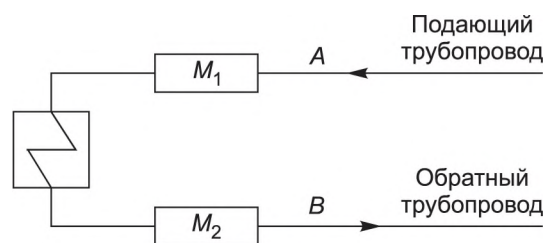


Рис. 1. Открытая система теплоснабжения

минимизации погрешностей измерения разностей расходов стандартным методом.

Из выражения (1) следует вывод: если погрешности расходомеров не превышают максимально допустимых значений, то и погрешность измерений разности расходов дифференциальным методом не превысит по модулю 2 %. Однако это не означает, что дифференциальный метод всегда точнее, чем стандартный. В [5] выполнен подробный сравнительный анализ двух методов косвенных измерений разности расходов и показано, что каждый из них имеет предпочтительную область применения. Введём обозначения:  $c = B/A$ ;  $k = p_1/p_2$ . Тогда основной результат этого анализа выразим в виде неравенства

$$|\delta_{\text{ст}}| < |\delta_{\text{диф}}|, \text{ если } k'' < k < k', \quad (3)$$

где  $k' = 1$ ;  $k'' = (1,5c - 0,5) / (1,5 - 0,5c)$ .

Величину  $c = B/A$  принято называть степенью открытости системы: с уменьшением значения  $c$  система становится более открытой (большее количество теплоносителя уходит на нужды горячего водоснабжения). При  $c = 1$  система является закрытой.

Из (3) следует, что погрешность стандартного метода по модулю меньше погрешности дифференциального, если отношение погрешностей расходомеров  $k = p_1/p_2$  находится в пределах от  $(1,5c - 0,5) / (1,5 - 0,5c)$  до 1. Заметим, что при этом погрешность расходомера в подающем трубопроводе всегда меньше погрешности расходомера в обратном трубопроводе, т. е. всегда  $k < 1$ . При  $k = 1$ ;  $(1,5c - 0,5) / (1,5 - 0,5c)$  погрешности методов совпадают.

**Выбор оптимального соотношения погрешностей расходомеров.** Найдём такое значение  $k$ , при котором в некоторой области измерения стандартный метод будет точнее, чем дифференциальный. При этом значение  $k$  должно быть как можно ближе к значению  $c = B/A$  (условие нулевой погрешности измерения разности расходов.) Нетривиальность решения этой задачи объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, степень открытости системы  $c = B/A$  определяется некоторыми конкретными значениями фактических расходов, при этом расходы не являются величиной постоянной, т. е. степень  $c$  изменяется во времени. Во-вторых, значения фактических расходов  $A, B$  неизвестны, а могут быть известны только их измеренные значения  $M_1, M_2$ .

Покажем, что при выборе значения  $k = c = B/A$ , при котором погрешность стандартного метода будет нулевой, мож-

Значения фактических  $A_i$ ,  $B_i$  и измеренных  $M_{1,i}$ ,  $M_{2,i}$  расходов в подающем и обратном трубопроводах системы

| Расход<br>теплоносителя | $i$  |      |       |     |       |       |       |       |      |      |
|-------------------------|------|------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|------|------|
|                         | 1    | 2    | 3     | 4   | 5     | 6     | 7     | 8     | 9    | 10   |
| $A_i$                   | 90   | 90   | 95    | 100 | 115   | 130   | 105   | 95    | 90   | 90   |
| $B_i$                   | 85   | 85   | 80    | 80  | 75    | 70    | 75    | 85    | 80   | 85   |
| $M_{1,i}$               | 97,2 | 97,2 | 102,6 | 108 | 124,2 | 140,4 | 113,4 | 102,6 | 97,2 | 97,2 |
| $M_{2,i}$               | 93,5 | 93,5 | 88,0  | 88  | 82,5  | 77,0  | 82,5  | 93,5  | 88,0 | 93,5 |

но применять усреднённые значения  $A$ ,  $B$ . Далее используем результаты измерений среднечасовых значений расходов теплоносителя, сохраняемые в архивах приборов учёта. Предположим, что имеются последовательности (размерностью  $n$ )  $M_{1,1}, M_{1,2}, \dots, M_{1,n}$  и  $M_{2,1}, M_{2,2}, \dots, M_{2,n}$  измеренных среднечасовых значений расхода в подающем и обратном трубопроводах, соответственно. Последовательности неизвестных фактических расходов обозначим  $A_{1,1}, A_{1,2}, \dots, A_{1,n}$  и  $B_{2,1}, B_{2,2}, \dots, B_{2,n}$ . Выразим измеренные значения расходов через фактические с учётом погрешностей расходомеров в виде

$$M_{1,i} = (1+r_1)A_i; \quad M_{2,i} = (1+r_2)B_i. \quad (4)$$

Фактическую  $\Delta_\Phi$  и измеренную  $\Delta_\Pi$  разности расходов на последовательности  $n$  измерений определим как

$$\Delta_\Phi = \sum(A_i - B_i), \quad i = 1, \dots, n; \quad (5)$$

$$\Delta_\Pi = \sum(M_{1,i} - M_{2,i}), \quad i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Найдём такое отношение  $x = p_1/p_2 = r_1/r_2$  погрешностей расходомеров, при котором  $\Delta_\Phi = \Delta_\Pi$ . Для этого запишем выражение (6) с учётом (4) и равенства  $r_1 = xr_2$ :

$$\sum(M_{1,i} - M_{2,i}) = \sum[(1+xr_2)A_i - (1+r_2)B_i], \quad i = 1, \dots, n.$$

После преобразования получим

$$\sum(M_{1,i} - M_{2,i}) = \sum(A_i - B_i) + r_2 \sum(xA_i - B_i), \quad i = 1, \dots, n.$$

Если использовать другое представление и учесть выражения (5), (6), то измеренную разность можно найти по соотношению

$$\Delta_\Pi = \Delta_\Phi + r_2 \sum(xA_i - B_i), \quad i = 1, \dots, n.$$

Очевидно, что измеренная и фактическая разности расходов будут совпадать, если выполняется равенство

$$\sum(xA_i - B_i) = x \sum A_i - \sum B_i = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Из выражения (7) найдём значение

$$x = \sum B_i / \sum A_i, \quad i = 1, \dots, n$$

или в другом представлении

$$x = B^* / A^*,$$

где  $A^*$ ,  $B^*$  – средние значения расходов в подающем и обратном трубопроводах в последовательности  $n$  измерений.

Приведём пример, подтверждающий справедливость определения величины  $k$  по усреднённым значениям  $A$ ,  $B$  (в соответствии с равенством  $c = B^* / A^*$ ), при котором погрешность стандартного метода будет нулевой.

Пусть фактические расходы в подающем и обратном трубопроводах изменяются в соответствии со значениями, указанными в таблице (единицы измерений расхода для простоты опустим в предположении, что они одинаковы для всех результатов измерений).

Из таблицы следует:  $\sum A_i = 1000$ ;  $\sum B_i = 800$ ;  $A^* = 100$ ;  $B^* = 80$ ;  $B^* / A^* = 0,8$ . Примем  $k = 0,8$ . Этому соотношению  $k$  соответствуют, например, погрешности расходомеров  $p_1 = 8$  и  $p_2 = 10$ . Для расходомеров с этими погрешностями имеем:  $\sum M_{1,i} = 1080$ ;  $\sum M_{2,i} = 880$ ; средние значения измеренных расходов  $M_1^* = 108$ ;  $M_2^* = 88$ . Разности средних и суммарных измеренных и фактических значений расходов при выбранных погрешностях расходомеров (удовлетворяющих соотношению  $k = B^* / A^* = 0,8$ ) совпадают. Поэтому при  $p_1 = 8$  и  $p_2 = 10$  погрешность измерения разности расходов  $\delta_{\text{ст}} = 0$ .

Рассмотрим другое обстоятельство, затрудняющее выбор оптимального значения  $k = p_1/p_2$  в соответствии со степенью с открытости системы. Очевидно, что если известна величина  $c$ , то проблема определения  $k$  отсутствует. Однако фактические значения расходов  $A$ ,  $B$  неизвестны. В лучшем случае известны результаты измерений  $M_1$ ,  $M_2$ . Но отношения фактических и измеренных расходов в общем случае не совпадают:  $c = B/A \neq M_2/M_1$ . Если же расходомеры впервые устанавливаются на объекте, то отсутствуют и результаты измерений  $M_1$ ,  $M_2$ , дающие представление о приблизительном значении степени открытости системы. Основываться на проектных характеристиках расходов также нецелесообразно, поскольку они могут значительно отличаться от реальных значений. Таким образом, возможность определения истинного значения  $c = B/A$  отсутствует, необходимо ориентироваться на некоторое прогнозируемое значение степени открытости системы. В связи с этим возникает вопрос о влиянии погрешности определения значения  $c$  и последующего выбора в соответствии с этим значением погрешностей расходомеров на погрешность измерения разности расходов стандартным методом.

Предположим, что выбрано значение  $k = p_1/p_2$  для системы со степенью открытости, равной  $c$ . Подставим  $p_1 = p_2 k$ ,  $B = Ac$  в выражение (2) и выразим относительную погрешность измерения разности расходов в виде

$$\delta_{\text{ст}} = \frac{p_1 A - p_2 B}{A - B} = \frac{p_2 A k - p_2 A c}{A - A c} = \frac{p_2 (k - c)}{1 - c}. \quad (8)$$

Предположим также, что расходомеры имеют погрешности  $p_2=2$  (максимально допустимое значение),  $p_1=2k$ . Очевидно, что такие погрешности представляют пару наибольших (по модулю) допустимых погрешностей с соотношением  $k=p_1/p_2$ . На рис. 2 представлены зависимости  $\delta_{\text{ст}}(c)$  для различных значений  $k=0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95$  и максимальных положительных допустимых погрешностей. Рассмотрим кривую 4 для  $k=p_1/p_2=0,8$ . Наибольшие допустимые погрешности расходомеров для этого значения  $k$  равны  $p_1=1,6$  и  $p_2=2$ . Подставим в выражение (8)  $k=0,8$ ;  $p_2=2$  и получим зависимость погрешности измерения разности расходов от степени открытости системы:

$$\delta_{\text{ст}} = 2(0,8 - c)/(1 - c).$$

Очевидно, что если  $c=k=0,8$ , то погрешность измерения разности расходов  $\delta_{\text{ст}}$  равна нулю (точка  $f$  на кривой 4). Если  $c < k$ , то погрешность  $\delta_{\text{ст}} > 0$  и увеличивается с уменьшением степени  $c$ , но не превышает значения  $2k=1,6$  (что следует из выражения (8)). Например, при  $c=0,5$  погрешность  $\delta_{\text{ст}}=1,2$  (точка  $g$  на кривой 4). Если  $c > k$ , то погрешность  $\delta_{\text{ст}} < 0$  и её модуль увеличивается вместе со степенью  $c$ , стремясь к бесконечности. Например, при  $c=0,9$  погрешность  $\delta_{\text{ст}} = -2$  (точка  $h$  на кривой 4); при  $c=0,99$  погрешность  $\delta_{\text{ст}} = -38$ ; при  $c=0,999$  погрешность  $\delta_{\text{ст}} = -398$ . Аналогичная тенденция изменения значения  $\delta_{\text{ст}}$  от степени открытости системы  $c$  прослеживается и для других значений  $k$ .

В общем случае для того, чтобы измерения разности расходов стандартным методом гарантированно выполнялись с погрешностью, не превышающей наибольшую из погрешностей расходомеров, необходимо выбирать расходомеры с соотношением погрешностей  $k=p_1/p_2$  не меньшим, чем степень открытости системы  $c$ . Безусловно, этому требованию удовлетворяет значение  $k=1$ , так как степень открытости системы, из которой осуществляется отбор теплоносителя, всегда меньше единицы. Однако излишнее завышение величины  $k$  нежелательно, поскольку при этом растёт погрешность  $\delta_{\text{ст}}$  (оставаясь при этом меньше 2 % при допустимых погрешностях расходомеров).

Перейдём к практическим рекомендациям по выбору оптимального значения  $k$ . Рекомендации основаны на опыте сервисного обслуживания приборов учёта,

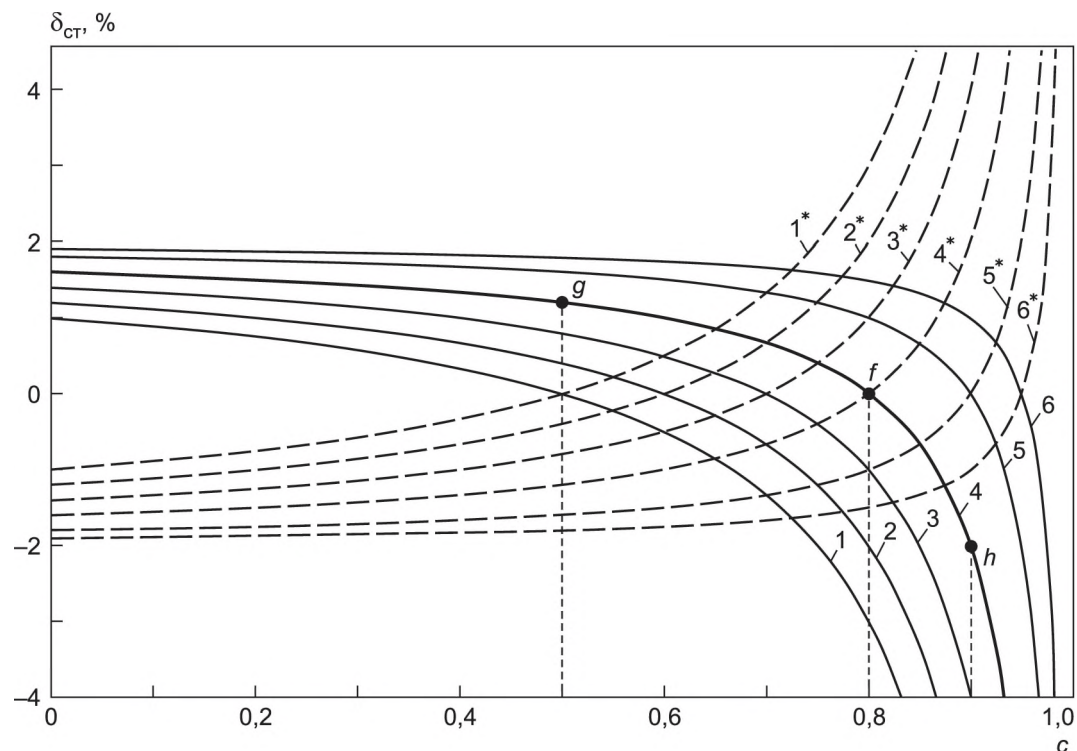


Рис. 2. Графики зависимости погрешности  $\delta_{\text{ст}}$  измерения разности расходов от степени  $c$  открытости системы для разных значений  $k=p_1/p_2$ :

1–6 – при  $k=0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95$ , соответственно, и максимальных положительных допустимых погрешностях  $p_1, p_2$ ; 1\*–6\* – зеркальные отображения кривых 1–6 для тех же значений  $k$  и пары наибольших по модулю отрицательных допустимых погрешностей  $p_1, p_2$

установленных в тепловых узлах более семисот объектов – потребителей тепловой энергии. Обслуживание выполняется коллективом сотрудников института автоматики и процессов управления ДВО РАН совместно с ООО «Инфовира» в течение последних 17 лет и предполагает, в частности, дистанционный сбор, анализ результатов измерений основных пара-

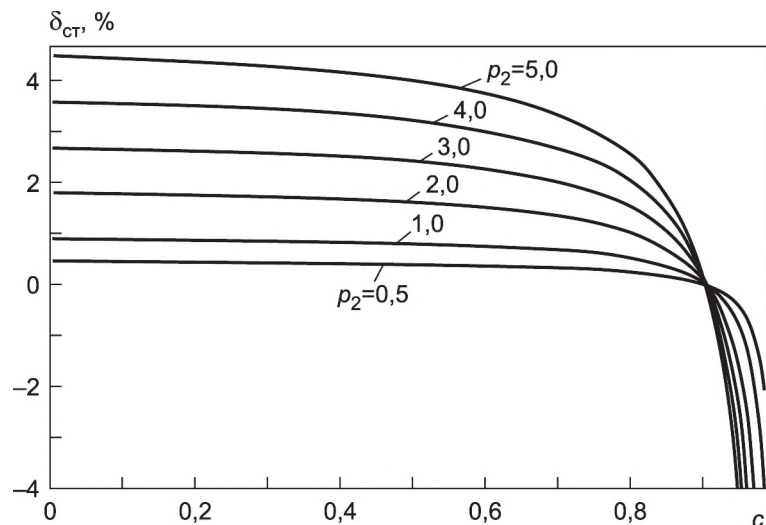


Рис. 3. Графики зависимости погрешности  $\delta_{\text{ст}}$  измерения разности расходов от степени  $c$  открытости системы при  $k=0,9$  и различных значениях  $p_2$

метров объектов и сдачу отчётов о потребляемых ресурсах в теплоснабжающую организацию. Анализ результатов измерений, полученных с установленных после поверки расходомеров, показывает, что степень открытости с систем горячего водоснабжения для реальных объектов колеблется в диапазоне от 0,5 до 0,92. При этом значения  $c$ , близкие к крайним значениям этого диапазона, встречались очень редко, а 90 % систем горячего водоснабжения имели степень открытости от 0,8 до 0,9. Исходя из имеющейся статистики представляется оптимальным выбор значения отношения погрешностей расходомеров  $k=0,9$ .

На рис. 3 приведены графики зависимости погрешности измерения разности расходов  $\delta_{\text{ср}}$  от степени открытости с системы для рекомендуемого значения  $k=0,9$  и различных значений  $p_2=0,5; 1; 2; p_2=3; 4; 5$ . Если степень открытости системы меньше 0,9, то погрешность измерений разности расходов будет меньше погрешности  $p_2$  и не превысит значения  $0,9p_2$ . Это означает, что разность расходов будет измеряться точнее, чем сами расходы. Рассмотрим ситуацию, при которой степень открытости системы больше 0,9. (Напомним, что при  $c=k=0,9$  погрешность  $\delta_{\text{ср}}=0$ ). Пусть  $c=0,95$ . Подставим в выражение (8)  $k=0,9$ ;  $c=0,95$  и получим  $\delta_{\text{ср}}=-p_2$ . В этом случае погрешность измерения разности расходов будет по модулю совпадать с погрешностью измерения расхода в обратном трубопроводе.

Таким образом, при выборе расходомеров с соотношением погрешностей  $k=p_1/p_2=0,9$  погрешность измерения разности расходов теплоносителя не превышает погрешность расходомера в обратном трубопроводе (при условии  $c \leq 0,95$ , соответствующем практически всем возможным открытым системам). Следовательно, если расходомеры с соотношением  $k=0,9$  удовлетворяют требованиям «Правил учёта тепловой энергии и теплоносителя», то погрешность измерения разности расходов не может быть больше 2 %.

Отметим, что риск повышения погрешности измерения разности расходов связан с выбором расходомеров, погрешности которых имеют разные знаки. Изменим знак  $k$  в приведённом выше примере ( $k=-0,9$ ). После подстановки  $k=-0,9$ ;  $c=0,95$  в выражение (8) получим  $\delta_{\text{ср}}=p_2(-0,9-0,95)/(1-0,95)=-37p_2$ . Тогда при погрешности расходомера в обратном трубопроводе 2 % и погрешности расходомера в прямом трубопроводе  $p_1=p_2k=-1,8$  % погрешность измерения разности расходов  $\delta_{\text{ср}}=-84$  %. Соответственно, если  $p_2=-2$  %, (а  $p_1=p_2k=1,8$  %), то  $\delta_{\text{ср}}=84$  %.

**Заключение.** Представленные в работе оценки двух (стандартного и дифференциального) методов измерений разности расходов, определяемых выражениями (1), (2), позволяют аналитически сопоставлять эти методы. При этом необходимо учесть, что численно определить погрешность конкретных измерений не представляется возможным, поскольку неизвестны погрешности измерительных приборов. Однако эти оценки дают возможность сформулировать практические рекомендации по использованию каждого метода.

Безусловным преимуществом дифференциального метода является то, что при его использовании погрешность измерения не зависит от измеряемого расхода и не может превы-

шать максимальную (по модулю) погрешность расходомеров (поскольку модуль среднего арифметического двух чисел не может превышать модуль большего из них). Очевидный недостаток дифференциального метода – дороговизна его реализации. Всё это определяет сферу предпочтительного применения дифференциального метода: если первоочерёдным требованием пользователя является измерение разности расходов с погрешностью в пределах погрешностей измеряемых приборов, то следует остановиться на дифференциальном методе (при возможности его реализации).

Погрешность измерения стандартным методом зависит от соотношения измеряемых расходов и стремится к бесконечности с уменьшением степени открытости системы. Однако при выполнении определенных условий стандартный метод может обеспечить лучший, по сравнению с дифференциальным методом, результат. Эти условия сводятся к следующему. Во-первых, необходимо выбирать пары расходомеров с погрешностями одинакового знака. Во-вторых, погрешность расходомера в подающем трубопроводе должна быть меньше (по модулю), чем погрешность расходомера в обратном трубопроводе. Если известна (хотя бы приблизительно) степень с открытости системы, то отношение погрешностей выбираемых расходомеров  $k=p_1/p_2$  должно быть как можно ближе к значению  $c$ . Для определения ориентировочного значения  $c$  можно использовать усреднённые значения измеряемых расходов. В противном случае рекомендуется принять степень открытости системы  $c=0,9$  и выбрать (отградуировать) погрешности расходомеров в соответствии со значением  $p_1/p_2=0,9$ . В этом случае целесообразно применять малозатратный (по сравнению с дифференциальным) стандартный метод измерения разности расходов.

## Л и т е р а т у р а

1. Лупей А. Г. О правилах учёта тепловой энергии и измерении разности масс // Коммерческий учёт энергоносителей: Труды 22 научн.-практ. конф. СПб., 2005. С. 181–190.
2. Лупей А. Г. Сравнение результатов непосредственных и косвенных измерений количества воды, потребляемой на нужды горячего водоснабжения // Коммерческий учёт энергоносителей: Труды 13 научн.-практ. конф. СПб., 2001. С. 153–161.
3. Пат. 2411457 РФ. Способ высокоточного дифференциально-интегрирующего измерения разности масс (объёмов) жидких и газообразных сред на основе сужающих устройств / А. Г. Лупей, В. И. Шутиков // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 4.
4. Чипулис В. П. Возможности повышения точности косвенных измерений в задаче учёта потребления горячей воды // Метрология. 2017. № 3. С. 3–13.
5. Чипулис В. П. Сравнительная оценка двух методов косвенных измерений разности расходов теплоносителя // Измерительная техника. 2012. № 9. С. 45–49.

Дата принятия: 16.04.2018.