

6. Andre S., Degiovanni A. A. A theoretical study of transient coupled conduction and radiation heat transfer in glass: phonic diffusivity measurements by the flash technique // Int. Heat Mass Transfer. 1995. V. 38. N 18. P. 3401—3412.

7. Kabayabaya Th., Yu Fan, Zhang Xinxin. Thermal diffusivity measurement of glass at high temperature by using flash method // J. Therm. Sci. 2004. V. 13. N 1. P. 91—96.

8. Мерзликин В. Г., Сидоров О. В., Товстоног В. А. Метод приповерхностной лазерной обработки полупрозрачных материалов в импульсном режиме // Труды Междунар. науч. симп. «Автотракторостроение». М.: МГТУ МАМИ, 2009. С. 154—158.

9. Кузнецов Г. В., Кац М. Д. Об условиях применения импульсных методов определения теплофизических характеристик конструкционных материалов // Изв. Томск. политех. ун-та. 2008. Т. 312. № 4. С. 10—13.

10. Кузнецов Г. В., Кац М. Д. Теоретический анализ методических погрешностей определения теплофизических характеристик конструкционных материалов импульсным методом в образце конечных размеров // Измерительная техника. 2009. № 4. С. 35—37; Kuznetsov G. V., Kats M. D. Pulse method systematic errors theoretical analysis for construction materials finite samples thermophysical characteristics determination // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 4. P. 384—386.

11. Яворский Б. М. Справочник по физике. М.: Наука, 1990.

12. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983.

13. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

14. Зайдель А. Н. Погрешности измерения физических величин. Л.: Наука, 1985.

Дата принятия 28.11.2011 г.

519.233.5:532.57

## Сравнительная оценка двух методов косвенных измерений разности расходов теплоносителя

В. П. ЧИПУЛИС

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

Приведены аналитические оценки погрешности для стандартного и дифференциального методов косвенных измерений разности расходов теплоносителя. Ограничены области предпочтительного применения каждого из методов.

**Ключевые слова:** расход теплоносителя, косвенные измерения.

The analytical estimations of standard and differential methods of indirect measurements of heatcarrier consumption difference are presented. The areas of preferable application of each method are limited.

**Key words:** heatcarrier consumption, indirect measurements.

Вопросы достоверности результатов измерений при решении задач технологического и коммерческого учета тепла и теплоносителей привлекают все большее внимание в связи с быстрым ростом числа устанавливаемых приборов учета на объектах теплоэнергетики. Это вполне объяснимо, поскольку недостоверные результаты являются источником нештатных, а порой и аварийных ситуаций при технологических измерениях и приводят к существенным перекосам в финансовых отношениях между поставщиком и потребителем энергоресурсов при коммерческих измерениях.

Наиболее проблемные с точки зрения достоверности — измерения расхода теплоносителя. При этом, по всей видимости, одной из самых обсуждаемых является проблема косвенных измерений разности расходов теплоносителя для нужд горячего водоснабжения в открытых системах теплообеспечения или утечки в закрытых системах [1]. Известно, что разности расходов с использованием двух расходомеров, установленных в подающем и обратном трубопроводах системы (назовем его стандартным методом), часто достигают десятки, сотни процентов. Особенно неприятны случаи, когда

да вследствие погрешностей расходомеров измеренная косвенным методом разность расходов отрицательна. Поэтому вполне естественно стремление избежать применения косвенных измерений, заменяя их прямыми [2]. Однако иногда косвенный метод измерения водоразбора оказывается единственным возможным. Например, на тепловых магистралях, отходящих от источника теплоты, а иногда и в других случаях иного способа измерения теплоносителя для нужд горячего водоснабжения просто не существует.

Чтобы повысить точность косвенных измерений, в [2] предложен альтернативный стандартному метод измерения разности расходов, названный дифференциальным. Не вдаваясь в детали инженерной реализации, отметим, что суть метода состоит в поочередном измерении расходов в подающем и обратном трубопроводах системы расходомерами 1 и 2 и расходомерами 2 и 1, соответственно. В [2] приведены примеры, подтверждающие существенное преимущество в точности измерений дифференциального метода над стандартным. Однако, естественно, что отдельные примеры не могут свидетельствовать об общности утверждения о достоинствах одного метода перед другим.

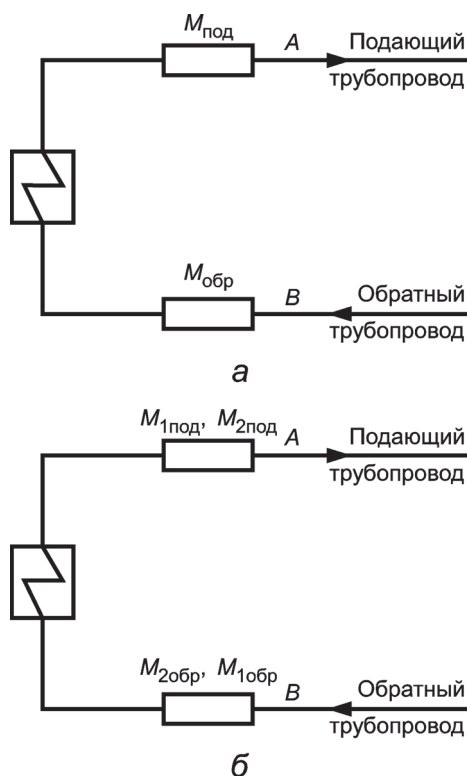


Рис. 1. Схема измерений разности расходов стандартным (а) и дифференциальным (б) методами

Цель данной работы — поиск ответов на следующие вопросы. Всегда ли погрешность измерения разности расходов дифференциальным методом меньше погрешности стандартного метода? И если ответ на этот вопрос отрицательный, то каковы области предпочтительного применения каждого из методов?

**Погрешность измерения разности расходов стандартным методом.** Обозначим  $k$  относительную погрешность расходомера, выраженную в долях,  $k = (M - A)/A$ , где  $A$  — фактическое значение измеренной массы  $M$  расхода, и  $p$  — относительную погрешность в процентах,  $p = 100k$ . На рис. 1, а условно изображена открытая система теплоснабжения, в которой измерения выполняются стандартным методом. Здесь  $A, B$  — фактические, а  $M_{\text{под}}, M_{\text{обр}}$  — измеренные расходы теплоносителя соответственно в подающем и обратном трубопроводах системы. Для простоты последующих рассуждений положим, что в период измерений расходы  $A$  и  $B$ , а также погрешности расходомеров постоянны и, следовательно, постоянны и измеренные расходы  $M_{\text{под}}$  и  $M_{\text{обр}}$ .

Выразим измеренные расходы через фактические с учетом погрешностей расходомеров:

$$M_{\text{под}} = (1 + k_1)A; M_{\text{обр}} = (1 + k_2)B. \quad (1)$$

Фактическая  $\Delta_{\text{ф}}$  и измеренная  $\Delta_{\text{изм}}$  разности расходов

$$\Delta_{\text{ф}} = A - B; \Delta_{\text{изм}} = M_{\text{под}} - M_{\text{обр}}.$$

Выражения для абсолютной  $\sigma$  и относительной в процентах  $\delta$  погрешностей измерения разности расходов стандартным методом с учетом (1) имеют вид

$$\sigma_{\text{ст}} = \Delta_{\text{изм}} - \Delta_{\text{ф}} = k_1A - k_2B;$$

$$\delta_{\text{ст}} = 100\sigma/(A - B) = (p_1A - p_2B)/(A - B). \quad (2)$$

Несложный анализ выражения (2) позволяет сформулировать следующие частные выводы:

погрешность измерения разности расходов стандартным методом равна нулю, если выполняется условие  $p_1A = p_2B$  или, в другом представлении,  $p_1/p_2 = B/A$  (погрешности расходомеров обратно пропорциональны расходам в трубопроводах, в которых они установлены);

если расходомеры имеют одинаковые погрешности ( $p_1 = p_2$ ), то погрешность измерения разности расходов стандартным методом совпадает с погрешностью расходомера ( $\delta_{\text{ст}} = p_1 = p_2$ ).

*Пример.* Пусть  $A = 100, B = 90$ . Единицы измерений расхода для простоты опущены, хотя, естественно, предполагается, что они одинаковы для всех результатов измерений. В этом случае выражение (2) примет вид

$$\delta_{\text{ст}} = 10p_1 - 9p_2. \quad (3)$$

Нулевая погрешность измерения разности расходов будет при выполнении условия

$$10p_1 = 9p_2. \quad (4)$$

Уравнение (4) имеет бесконечное множество решений. Одно из них:  $p_1 = 9, p_2 = 10$ . При этом измеренные значения расходов составят  $M_{\text{под}} = 109, M_{\text{обр}} = 99, \Delta_{\text{изм}} = \Delta_{\text{ф}}$  и, следовательно,  $\delta_{\text{ст}} = 0$ .

Пусть оба расходомера имеют одинаковую погрешность, например  $p_1 = p_2 = -10$ . Тогда  $M_{\text{под}} = 90, M_{\text{обр}} = 81, \Delta_{\text{изм}} = 9, \Delta_{\text{ф}} = 10, \sigma_{\text{ст}} = \Delta_{\text{изм}} - \Delta_{\text{ф}} = -1$  и, следовательно,  $\delta_{\text{ст}} = -10\%$ .

Вернемся к рассмотрению выражения (3), отображающего в общем случае зависимость погрешности измерения разности расходов от погрешностей расходомеров для конкретных фактических расходов  $A = 100, B = 90$ . Уравнение (3) так же, как и (2), имеет бесконечное множество решений.

Для сужения множества решений уравнения (3) с целью перехода к области «рабочих» поступим следующим образом. Допустим, что относительная погрешность каждого расходомера не может превышать (по модулю) 10 %. Практика поверки измерительных приборов, используемых в узлах учета тепловой энергии, показывает, что данное ограничение вполне реально. Заметим, однако, что уровень 10 % может быть изменен в случае необходимости без потери общности изложения.

В соответствии с принятым допущением построим графические зависимости, связывающие значения из области «рабочих» решений уравнения (3) и позволяющие определить погрешность измерения разности расходов. На рис. 2, а приведена номограмма  $\delta_{\text{ст}}(p_1)$  — графики прямых, соответствующих уравнению (3) для различных значений  $p_2$  (в пределах  $\pm 10\%$ ) и вписанных в область рабочих решений. Номограмма позволяет определить  $\delta_{\text{ст}}$  для любой пары погрешностей расходомеров  $p_1$  и  $p_2$ . Пусть, например,  $p_1 = 7, p_2 = 5$ . На рис. 2, а показана точка для этой пары погрешностей расходомеров, соответствующая  $\delta_{\text{ст}} = 10 \cdot 7 - 9 \cdot 5 = 25$  согласно (3).

**Погрешность измерения разности расходов дифференциальным методом.** На рис. 1, б условно изображена схема измерений разности расходов дифференциальным мето-

дом. Рассмотрим два соседних по времени периода измерений расхода. В первом из них выполняется измерение расхода в подающем трубопроводе расходомером 1 ( $M_{1\text{под}}$ ), в обратном — расходомером 2 ( $M_{2\text{обр}}$ ), во втором периоде — в подающем трубопроводе расходомером 2 ( $M_{2\text{под}}$ ), в обратном — расходомером 1 ( $M_{1\text{обр}}$ ). При этом в качестве результата измерений расхода в подающем трубопроводе принимается полусумма  $M_{\text{под}} = 0,5(M_{1\text{под}} + M_{2\text{под}})$ , а в обратном —  $M_{\text{обр}} = 0,5(M_{2\text{обр}} + M_{1\text{обр}})$ .

Выразим измеренные расходы и их разности через фактические расходы с учетом погрешностей расходомеров:

$$M_{\text{под}} = 0,5 [(1 + k_1)A + (1 + k_2)A] = A + 0,5 A(k_1 + k_2);$$

$$M_{\text{обр}} = 0,5 [(1 + k_2)B + (1 + k_1)B] = B + 0,5 B(k_1 + k_2);$$

$$\Delta_{\text{изм}} = M_{\text{под}} - M_{\text{обр}} = (A - B) + 0,5(A - B)(k_1 + k_2).$$

Тогда выражения для погрешностей измерения разности расходов дифференциальным методом примут вид

$$\sigma_{\text{диф}} = \Delta_{\text{изм}} - \Delta_{\text{ф}} = 0,5(A - B)(k_1 + k_2);$$

$$\delta_{\text{диф}} = 100 \sigma_{\text{диф}} / (A - B) = 0,5 (p_1 + p_2). \quad (5)$$

Из анализа (5) следует:

погрешность измерения разности расходов дифференциальным методом не зависит от измеряемых расходов в отличие от стандартного метода;

погрешность измерения разности расходов дифференциальным методом равна нулю, если  $p_1 = -p_2$ ;

если погрешности расходомеров одинаковые ( $p_1 = p_2$ ), то погрешность измерения разности расходов дифференциальным методом равна погрешности расходомера и, следовательно, совпадает с погрешностью измерения разности расходов стандартным методом ( $\delta_{\text{диф}} = \delta_{\text{ст}} = p_1 = p_2$ ).

На рис. 2, б представлена номограмма зависимости погрешности измерений разности расходов дифференциальным методом от погрешностей расходомеров. Визуальное сопоставление номограмм на рис. 2 позволяет отметить при принятом допущении, что погрешности расходомеров не превышают по модулю 10 %, погрешность измерения разности расходов стандартным методом находится в пределах  $\pm 190$  % (для  $A = 100$ ,  $B = 90$ ), а дифференциальным методом (независимо от расходов) — в пределах  $\pm 10$  %.

**Сравнение стандартного и дифференциального методов измерения разности расходов.** Ответ на вопрос, всегда ли погрешность измерения разности расходов дифференциальным методом меньше погрешности стандартного метода, достаточно прост. Нет, не всегда, и приведенный выше пример это подтверждает. Действительно, при  $A = 100$ ,  $B = 90$ ,  $p_1 = 9$ ,  $p_2 = 10$  погрешность измерения разности расходов стандартным методом равна нулю, а дифференциальным 9,5 %.

Для ответа на вопрос, каковы области предпочтительного применения каждого из методов, сопоставим в общем виде погрешности измерения расходов двух анализируемых методов. Неравенство

$$|\delta_{\text{ст}}| < |\delta_{\text{диф}}| \quad (6)$$

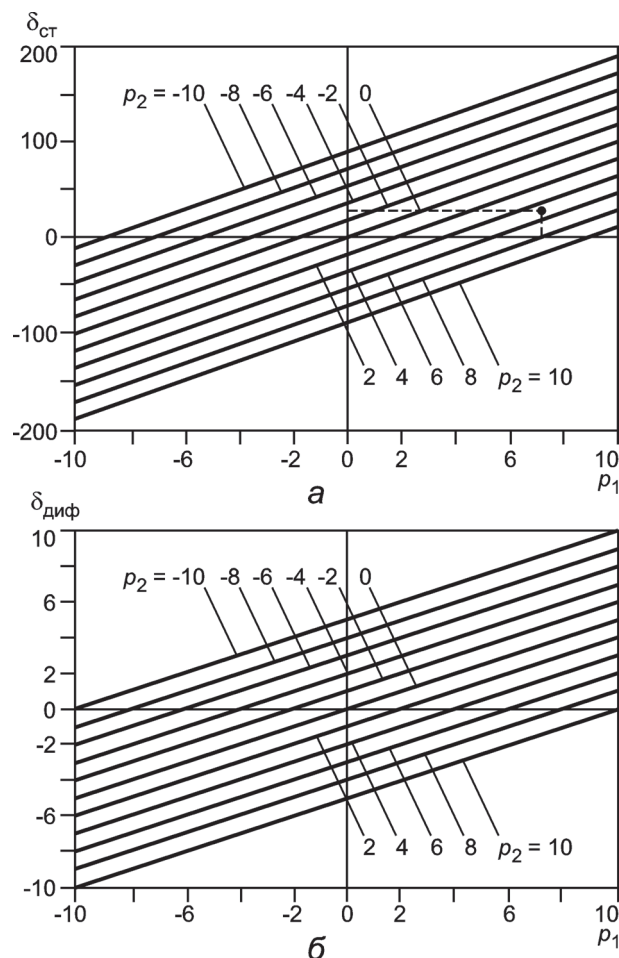


Рис. 2. Номограммы зависимости погрешностей измерения разности расходов стандартным методом для  $A = 100$ ,  $B = 90$  (а) и дифференциальным (б) от погрешностей расходомеров

задает условие, при выполнении которого погрешность измерения стандартным методом меньше погрешности дифференциального. Сравнение погрешностей естественно выполнить по их абсолютным значениям, поскольку, например, результат измерения с погрешностью 1 % следует признать лучшим, чем результат измерения с погрешностью –5 %.

Вначале рассмотрим частный случай сопоставления погрешностей двух методов для конкретных расходов  $A = 100$ ,  $B = 90$ . Представим (6), выразив  $\delta_{\text{ст}}$  и  $\delta_{\text{диф}}$  через  $p_1$  и  $p_2$ , как

$$|10p_1 - 9p_2| < |0,5 (p_1 + p_2)|. \quad (7)$$

Для решения неравенства (7) выполним следующие преобразования:

$$\begin{aligned} |10p_1 - 9p_2| < |0,5 (p_1 + p_2)| &\rightarrow (10p_1 - 9p_2)^2 - \\ &- (0,5(p_1 + p_2))^2 < 0 \rightarrow [(10p_1 - 9p_2) - 0,5 (p_1 + p_2)] \times \\ &\times [(10p_1 - 9p_2) + 0,5 (p_1 + p_2)] < 0 \rightarrow \\ &\rightarrow (9,5p_1 - 9,5p_2) (10,5p_1 - 8,5p_2) < 0. \end{aligned}$$

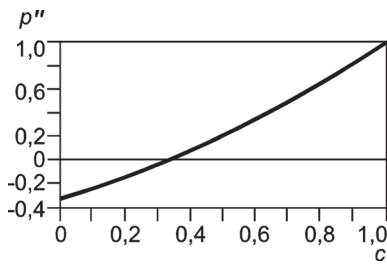


Рис. 3. График зависимости границы  $p''$  области применения стандартного метода от степени с открытости системы

Обозначив  $p = p_1/p_2$ , получим

$$(9,5p - 9,5)(10,5p - 8,5) < 0. \quad (8)$$

Отметим, что величина  $p$  характеризует степень близости погрешностей  $p_1$  и  $p_2$  расходомеров. Чем ближе  $p$  к  $\pm 1$ , тем менее разнятся погрешности расходомеров. При этом если  $p < 0$ , то погрешности расходомеров противоположны по знаку. Если неравенство (8) задает условие, при выполнении которого погрешность измерения стандартным методом меньше погрешности дифференциального метода, то уравнение

$$(9,5p - 9,5)(10,5p - 8,5) = 0 \quad (9)$$

определяет условие равенства погрешностей этих методов.

Решение неравенства (8), если не вдаваться в очевидные детали его получения, выглядит следующим образом:

$$|\delta_{\text{ст}}| < |\delta_{\text{диф}}|, \text{ если } 0,809 \dots < p < 1.$$

При  $p' = 1$  и  $p'' = 0,809 \dots$  (здесь  $p'$  и  $p''$  — корни уравнения (9), получаемые из условия равенства нулю каждой из скобок этого уравнения) погрешности измерений стандартным и дифференциальным методом одинаковы:  $|\delta_{\text{ст}}| = |\delta_{\text{диф}}|$ . Во всех остальных случаях ( $p > 1$  или  $p < 0,809 \dots$ ) имеем  $|\delta_{\text{диф}}| < |\delta_{\text{ст}}|$ .

Приведенные выше соотношения свидетельствуют о том, что стандартный метод (при конкретном соотношении расходов в подающем и обратном трубопроводах) дает меньшую погрешность вычислений разности расходов по сравнению с дифференциальным, если  $p_1 < p_2$ , расходомеры достаточно хорошо согласованы ( $p_1/p_2 > 0,81$ ) и их погрешности имеют один и тот же знак.

Перейдем к общему случаю сравнения погрешностей двух методов. Для этого раскроем неравенство (6) через  $A$ ,  $B$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ :

$$|(p_1 A - p_2 B) / (A - B)| < 0,5 |(p_1 + p_2)|. \quad (10)$$

Далее, обозначив  $c = B/A$ ,  $p = p_1/p_2$  и выполнив преобразования, аналогичные тем, что были применены к (7) (опустив при этом все промежуточные выкладки ввиду их громоздкости), получим из (10):

$$[(p - c) - 0,5(1 - c)(1 + p)] [(p - c) + 0,5(1 - c)(1 + p)] < 0. \quad (11)$$

Это неравенство в общем виде определяет условие, при котором точность измерения стандартного метода выше, чем дифференциального, а уравнение

$$[(p - c) - 0,5(1 - c)(1 + p)] [(p - c) + 0,5(1 - c)(1 + p)] = 0 \quad (12)$$

соответствует равенству погрешностей этих методов. Решение неравенства (11) на содержательном уровне (аналогично решению рассмотренного ранее частного случая для конкретных значений расходов) можно выразить в виде

$$|\delta_{\text{ст}}| < |\delta_{\text{диф}}|, \text{ если } p'' < p < p',$$

где  $p' = 1$ ,  $p'' = (1,5c - 0,5)/(1,5 - 0,5c)$  — корни уравнения (12). При  $p = p'$  и  $p''$  погрешности измерений разности расходов стандартным и дифференциальным методами совпадают. Во всех остальных случаях при  $p > 1$  или  $p < p''$  имеем  $|\delta_{\text{диф}}| < |\delta_{\text{ст}}|$ .

Отметим, что одна из величин, ограничивающих область (назовем ее областью  $R_{\text{ст}}$ ), в которой стандартный метод точнее дифференциального, всегда постоянна ( $p' = 1$ ), а другая —  $p'' = (1,5c - 0,5)/(1,5 - 0,5c)$  является функцией от  $c = B/A$ , характеризующей степень открытости системы. На рис. 3 представлен график зависимости  $p''(c)$ , из которого следует, что, например, для любой системы со степенью открытости  $c = 0,7$  область  $R_{\text{ст}}$  определяется как  $0,478 \dots < p < 1$ . Это означает, что если погрешность второго расходомера превышает по модулю погрешность первого не более, чем примерно в два раза, и погрешности расходомеров имеют одинаковый знак, то стандартный метод даст более точный результат при измерении разности расходов, чем дифференциальный. При этом погрешность измерения будет близка к нулю, если  $p_1/p_2 \approx 0,7$ .

*Замечание.* Наряду с введенным выше определением относительной погрешности (погрешность в долях  $k = (M - A)/A$ , в процентах  $p = 100k$ ) используется и другое определение, в котором в качестве базы при делении разности измеренной и фактической величин берется не фактическая, а измеренная величина, т. е.  $k = (M - A)/M$ . В этом случае фактические расходы в подающем и обратном трубопроводах можно выразить через измеренные следующим образом:

$$A = (1 - k_1) M_{\text{под}}; \quad B = (1 - k_2) M_{\text{обр}}. \quad (13)$$

Тогда выражения для погрешностей измерения разности расходов стандартным методом с учетом выражения (13) примут вид

$$\sigma_{\text{ст}} = \Delta_{\text{изм}} - \Delta_{\text{ф}} = k_1 M_{\text{под}} - k_2 M_{\text{обр}};$$

$$\delta_{\text{ст}} = (p_1 M_{\text{под}} - p_2 M_{\text{обр}}) / (M_{\text{под}} - M_{\text{обр}}).$$

Нетрудно убедиться (при необходимости выполнив преобразования с учетом (13)), что погрешность измерения дифференциальным методом определяется тем же выражением (5), что было получено для предыдущей трактовки относительной погрешности. Это естественно, поскольку погрешность  $\delta_{\text{диф}}$  зависит только от погрешностей расходомеров.

**Выводы.** Приведенные оценки двух методов измерения разности расходов позволяют выполнить умозрительное аналитическое сопоставление методов. Но при этом следует учесть, что численно определить погрешность конкретных измерений не представляется возможным, поскольку неизвестны погрешности измерительных приборов. Однако эти оценки дают возможность сформулировать практические рекомендации по применению каждого метода.

Безусловное преимущество дифференциального метода состоит в том, что при его использовании погрешность измерения не зависит от измеряемого расхода и не может превышать максимальную (по модулю) погрешность расходомеров (поскольку модуль среднего арифметического двух чисел не может превышать модуль большего из них). В то же время погрешность измерения стандартным методом зависит от измеряемых расходов (а точнее от их соотношения) и стремится к бесконечности с уменьшением степени открытости системы. Все это определяет сферу предпочтительного применения дифференциального метода. Если первоочередным требованием пользователя являются измерения разности расходов с погрешностью в пределах погрешностей измеряемых приборов, то следует остановиться на дифференциальном методе.

Однако при выполнении определенных условий стандартный метод может обеспечить лучший результат по сравнению с дифференциальным. Эти условия сводятся к следующему. Во-первых, необходимо выбирать пары расходомеров с погрешностями одного и того же знака. Во-вторых, в подающий трубопровод следует устанавливать расходомер с меньшей (по модулю) погрешностью, а в обратный — с

большой. Если известна (хотя бы приблизительно) степень с открытости системы, то надо стремиться к тому, чтобы отношение погрешностей выбираемых расходомеров  $p = p_1/p_2$  было больше значения  $s$ , определяемого из графика рис. 3 (оптимальный случай — приближалось к  $s$ ). Представляется, что эти условия нетрудно выполнить. И если эта задача будет решена, то целесообразно использовать малозатратный (по сравнению с дифференциальным) стандартный метод измерения разности расходов теплоносителя.

#### Л и т е р а т у р а

1. Лупей А. Г. О правилах учета тепловой энергии и измерении разности масс // Коммерческий учет энергоносителей: Труды 22-й науч.-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 учет энергоносителей: Труды 13-й науч.-практ. конф. СПб., 2001. С. 153—161.

Дата принятия 01.12.2011 г.

621.385.6.6

## Исследование возможности плавления базальта с помощью СВЧ-энергии

А. В. МАМОНТОВ, В. Н. НЕФЕДОВ, А. Л. ТУВ, Д. А. ЯЗЫКОВ

Московский государственный институт электроники и математики,  
Москва, Россия, e-mail: lmis@miem.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований применения микроволновой энергии для термообработки базальта. Приведены численные результаты и график изменения температуры образца базальта. Показано, что микроволновый нагрев имеет ряд преимуществ перед традиционными методами плавления базальта с использованием сжигаемого топлива.

**Ключевые слова:** СВЧ-излучение, теплоизоляционный материал, распределение температуры, волновод, базальт, плавление, термообработка.

The experimental research results of basalt thermal treatment with the microwave electromagnetic energy application are presented. The numerical results as well as a diagram of basalt temperature change are presented. It is shown that microwave treatment has a number of advantages over the traditional ways of basalt melting with the use of burnable fuel.

**Key words:** microwave radiation, heat-insulating material, temperature distribution, waveguide, basalt, melting, thermal treatment.

В условиях современного производства все большее внимание уделяется поиску новых технологических решений, соответствующих требованиям экологической чистоты, сбережения энергетических ресурсов с одновременным повышением эффективности технологических процессов. Разрабатываются новые материалы, отвечающие современным требованиям, производство которых требует внедрения новых технологических процессов, так как традиционные технологии в этом случае либо оказываются малоэффективными, либо вовсе не способными привести к необходимому результату. Ниже рассмотрен пример практического изучения возможности применения современных технологий для обработки материалов.

Предпосылкой для проведения данного исследования явилась необходимость модернизации технологии произ-

водства базальтового утеплителя на одном из российских предприятий. Существующий технологический процесс включает плавление базальтового гравия, получение сверхтонкого штапельного волокна из расплава базальта с его одновременной пропиткой связующим веществом, формование полотна утеплителя с последующим отверждением связующего [1, 2]. Наиболее затратным и трудоемким этапом технологического цикла является именно процесс плавления базальта, поскольку обладает рядом недостатков:

длительный этап запуска плавильной печи (несколько дней);

применение кокса в качестве топлива для плавильной печи (в условиях данного технологического процесса);

необходимость использования для плавления щебня базальта только определенных фракций;