

Неразрушающий теплотметрический метод диагностики отопительных приборов и систем

А. Д. ЗОНОВА, В. Я. ЧЕРЕПАНОВ

Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск, Россия,
e-mail: annet_zonova@mail.ru

Предложен неразрушающий теплотметрический метод оперативных измерений тепловой мощности в системах теплоснабжения с использованием накладных датчиков. Проведен сравнительный анализ результатов измерений, полученных тремя методами: традиционным энтальпийным, прямым теплотметрическим и предлагаемым.

Ключевые слова: теплоноситель, тепловая мощность и расход, накладной датчик, неразрушающий теплотметрический метод, отопительная система.

The non-destructive heat-measurement method of the operative heat power measurements in heating systems is considered. A comparative analysis of measurement results obtained by three methods — the traditional enthalpy, direct heat-measurement and non-destructive heat-measurement — is carried out.

Key words: heat carrier, heat power and flow, heat flux sensor, non-destructive heat-measurement method, heating system.

При эксплуатации зданий и сооружений в отопительный сезон необходимо определять эффективность работы приборов и систем теплоснабжения. Главным показателем при этом является тепловая мощность, выделяемая теплоносителем в отапливаемое помещение. Существующие приборы учета тепловой энергии (теплосчетчики) — громоздкие и дорогостоящие устройства, предусматривающие врезку датчиков температуры, расхода и давления в трубопроводы отопительной системы. Поэтому их невозможно использовать для оперативной диагностики исправности приборов и систем отопления.

В статье рассмотрен неразрушающий метод измерений тепловой мощности приборов и систем отопления, основанный на использовании только накладных датчиков теплового потока и температуры [1]. Их устанавливают на поверхности трубопроводов отопительной системы (рис. 1). Датчики теплового потока часто называют тепломерами, следовательно, предлагаемый метод — неразрушающий теплотметрический, ставший развитием теплотметрического метода, предусматривающего врезку в трубопровод отопительной системы специального измерительного теплообменника [2].

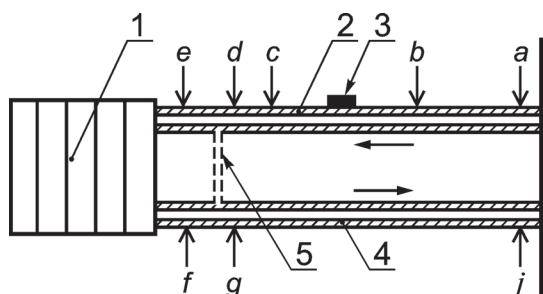


Рис.1. Схема расположения датчиков при диагностике отопительных приборов и систем:

1 — отопительный прибор; 2, 4 — трубопроводы; 3 — датчик теплового потока; 5 — перемычка; a—j — места установки датчиков температуры

Сущность метода заключается в следующем. Нагретый теплоноситель, двигаясь по трубопроводу, охлаждается вследствие теплообмена со средой, имеющей более низкую температуру. При этом (см. рис. 1) на участке его поверхности bc площадью F создается тепловой поток Q плотностью q , определяемый по закону Ньютона [3]:

$$Q = qF = \alpha(t_{\text{тр}} - t_{\text{ср}}) F,$$

где α — коэффициент теплоотдачи; $t_{\text{тр}}$, $t_{\text{ср}}$ — средняя температура поверхности трубопровода и окружающей его среды, соответственно.

Тепловую энергию E (количество теплоты), теряемую теплоносителем при охлаждении, вычисляют по формуле [4]:

$$E = H_b - H_c = m(h_b - h_c) = m \left[\int_0^{t_b} c_p(t) dt - \int_0^{t_c} c_p(t) dt \right] = m \int_{t_c}^{t_b} c_p(t) dt, \quad (1)$$

где H_b , H_c , h_b , h_c — энтальпия и удельная энтальпия в точках b и c , соответственно; m , c_p — масса и теплоемкость теплоносителя при давлении p , охлаждаемого от температуры t_b до t_c .

Интеграл в (1) часто представляют в виде соотношения

$$\int_{t_c}^{t_b} c_p(t) dt = K_S(t, p)(t_b - t_c) = K_S(t, p) \Delta t_{bc},$$

где $K_S(t, p)$ — коэффициент, значения которого в настоящее время установлены в виде функции от температуры и давления, являющейся стандартной справочной характеристикой только для чистой дистиллированной воды как теплоносителя.

С учетом этого формула для определения тепловой мощности (теплого потока) как энергии или теплоты, выделяемой теплоносителем в единицу времени, имеет вид

$$P_{bc} = dE/d\tau = K_S \Delta t_{bc} dm/d\tau = K_S G_M \Delta t_{bc}, \quad (2)$$

где G_M — производная массы m теплоносителя по времени τ (массовый расход).

Формула (2) положена в основу классического *энтальпийного* метода измерений тепловой мощности в закрытых системах водяного теплоснабжения. Учет тепловыделения этим методом при использовании других теплоносителей, например силиконового масла, затруднен из-за отсутствия для них точных значений коэффициента K_S .

Ввиду равенства Q и P_{bc} , понижение температуры теплоносителя связано с его параметрами и характеристиками теплообмена соотношением

$$\Delta t_{bc} = Q/(K_S G_M) = \alpha(t_{tp} - t_{cp}) F/(K_S G_M).$$

Отсюда следует, что измерение Δt_{bc} при известных значениях q , F может дать информацию о таких параметрах теплоносителя, как K_S или G_M . Действительно, в этом случае выражение

$$G_M = qF/(K_S \Delta t_{bc}) \quad (3)$$

является уравнением косвенных измерений массового расхода теплоносителя теплотметрическим методом. Если значения G_M получены другим способом, то из (3) можно найти действительные значения K_S теплоносителя, используемого в системе отопления.

На рис. 2 приведены результаты измерений температурной зависимости Δt_{bc} на расходомерном участке bc (см. рис. 1) длиной $l = 1,0$ м трубопровода диаметром 20 мм при различных значениях расхода G_M [5]; $\Delta t_{bc} < 0,1$ °C при низких температурах теплоносителя.

Таким образом, одной из главных задач при реализации этого метода является измерение малых разностей температур на поверхности трубопровода. Для ее решения в данной работе используют накладные многоспайные дифференциальные датчики температуры.

Длину l выбирают исходя из возможностей измерителя сигналов и чувствительности S датчиков. Если измеритель имеет погрешность 1 мкВ, а датчик разности температур содержит, например, 7 пар спаев дифференциальных медь-константановых преобразователей и его чувствительность при этом 300 мкВ/°C, то погрешность измерений разности температур составит около 0,0035 °C. Следовательно, при $\Delta t = 0,1$ °C относительная погрешность измерений составит 3,5 %.

Для измерений плотности теплового потока также используют накладной датчик, расположенный на расходомерном участке между другими датчиками температуры. Электрический сигнал E датчика позволяет рассчитать q по формуле [6]:

$$q = KE,$$

где K — коэффициент преобразования.

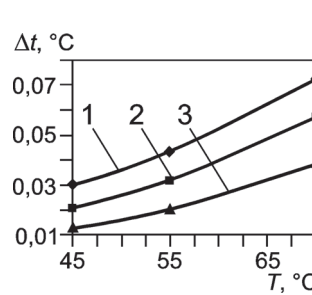


Рис. 2. Зависимость разности температуры Δt_{bc} на расходомерном участке bc от температуры T теплоносителя для разного массового расхода:

1, 2, 3 — соответственно $G_M = 0,056; 0,168; 0,292$ кг/с

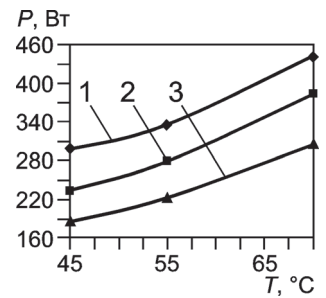


Рис. 3. Зависимость мощности P_{ef} отопительного прибора от температуры T теплоносителя для разного массового расхода G_M , как на рис. 2

Измерение перепада температуры ΔT_{ef} на отопительном приборе в точках e , f позволяет определить мощность P_{ef} по формуле, аналогичной (2):

$$P_{ef} = K_S G_M \Delta T_{ef}. \quad (4)$$

Подставив (3) в (4) можно найти искомую тепловую мощность, выделяемую отопительным прибором [7]:

$$P_{ef} = Q \Delta T_{ef} / \Delta t_{bc} = q F \Delta T_{ef} / \Delta t_{bc}. \quad (5)$$

Соотношение (5) является основой неразрушающего теплотметрического метода измерений тепловой мощности в приборах и системах отопления. Главное преимущество метода — отсутствие необходимости использовать при расчете мощности данные по энтальпии (теплоемкости) теплоносителя. Поэтому этот метод пригоден для измерений тепловой мощности в системах теплоснабжения с любым теплоносителем.

Разность температур ΔT_{ef} зависит от мощности отопительного прибора и составляет обычно больше 1 °C. Поэтому ее измерения имеют меньшую погрешность по сравнению с Δt_{bc} .

На рис. 3 приведены результаты теплотметрических измерений P_{ef} отопительного прибора в зависимости от температуры теплоносителя T при трех значениях его расхода G_M [5, 7].

Измерение перепада температуры в точках d , g (см. рис. 1) позволяет определить мощность, выделяемую теплоносителем в системе отопительный прибор—перемычка (байпас). В случае перекрытия отопительного прибора или его сильного загрязнения теплоноситель частично или полностью протекает по перемычке. При этом ΔT_{dg} может изменяться от максимального значения, соответствующего теплоотдаче с полной поверхности исправной батареи и поверхности перемычки, до минимального, соответствующего теплоотдаче только с поверхности перемычки. Эти значения будут соответствовать выделяемой системой тепловой мощности, рассчитанной по формуле:

$$P_{dg} = q F \Delta T_{dg} / \Delta t_{bc}.$$

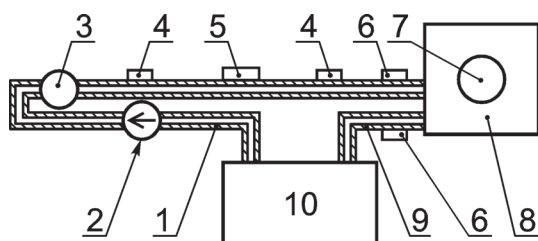


Рис. 4. Экспериментальная установка для сравнения трех методов измерений тепловой мощности:

1 — подающий трубопровод; 2 — электронасос; 3 — расходомер; 4, 6 — накладные датчики разности температур участка трубопровода и теплообменника, соответственно; 5, 7 — датчики теплового потока; 8 — теплообменник; 9 — обратный трубопровод; 10 — термостат

По разности температур в точках a, j определяют мощность, выделяемую теплоносителем во всей системе отопления — отопительный прибор—перемычка—трубопроводы, представленной на рис. 1:

$$P_{aj} = qF\Delta T_{aj}/\Delta t_{bc}.$$

Для оценки погрешности предлагаемого метода проведено сравнение результатов измерений тепловой мощности тремя методами: энтальпийным, методом прямых измерений и предлагаемым [8—10]. Экспериментальная установка, предназначенная для этого, показана на рис. 4. Она состоит из подающего трубопровода 1; электронасоса 2; расходомера 3 с вентилем для регулирования расхода теплоносителя на участке трубопровода с накладными датчиками 4 разности температур и датчиком 5 теплового потока; теплообменника 8 с накладными датчиками 6 разности температур на его входе и выходе и датчиками 7 теплового потока на поверхности. Теплообменник 8 представляет параллелепипед из сплава алюминия размером 330×330×24 мм с бифилярным каналом внутри, обеспечивающим равномерное распределение температуры по его поверхности. Теплообменник соединен обратным трубопроводом 9 с термостатом 10. Электронасос 2 обеспечивает циркуляцию теплоносителя, измеряемого расходомером 3. Температуру теплоносителя задают и поддерживают постоянной в диапазоне 40—70 °С с помощью термостата 10.

Используя данную установку, тепловую мощность, выделяемую теплообменником, измеряют одновременно тремя указанными методами.

Первый — традиционный энтальпийный метод, где для определения тепловой мощности применяют формулу

$$P_1 = K_S \rho G_V \Delta T, \quad (6)$$

где ρ , G_V — плотность и объемный расход теплоносителя, измеряемый расходомером 3; ΔT — разность температур на входе и выходе теплообменника, измеряемая датчиками 6.

Второй метод основан на прямой зависимости тепловой мощности, выделяемой теплоносителем, от плотности теплового потока, определяемой датчиками 7 на поверхности теплообменника. Для приближения поверхности излучения к поверхности теплообменника 8 датчики покрывают алюминиевой фольгой. Зная плотность q теплового потока на поверхности теплообменника и его площадь F_0 , выделяемую им мощность находят по формуле

$$P_2 = qF_0, \quad (7)$$

Третий — неразрушающий теплотрический метод позволяет определить тепловую мощность P_3 , выделяемую теплообменником, по формуле, аналогичной (5):

$$P_3 = q_0 F_0 \Delta T / \Delta t, \quad (8)$$

где q_0 — плотность теплового потока, измеренная датчиком 5; Δt , ΔT — разности температур, измеренные датчиками 4 и 6, соответственно.

Рассмотренные методы независимо друг от друга позволяют сравнить результаты измерений мощности, выделяемой теплоносителем на поверхности теплообменника — имитатора отопительного прибора.

В таблице приведены значения основных измеряемых величин Δt , ΔT , q и результаты расчета искомых значений мощности P_1 , P_2 , P_3 по (6)—(8) при разной температуре теплоносителя T и одинаковом расходе $G_m = 0,051$ кг/с. Анализ таблицы показывает, что значения тепловой мощности, полученные неразрушающим методом, занижены в среднем на 6 %, а результаты энтальпийного метода завышены в среднем на 5 % по сравнению с методом непосредственного (прямого) измерения. Теоретическая оценка погрешности неразрушающего метода в основном обусловлена применением накладных датчиков и составляет 6 % [7, 11]. Завышение результатов, полученных энтальпийным методом на основе данных об энтальпии и плотности чистой дистиллированной воды, можно обосновать различием этих свойств у воды, используемой в установке, возможно содержащей газовую фазу.

Таким образом, сравнительный анализ трех методов измерений тепловой мощности демонстрирует ряд преимуществ неразрушающего метода и перспективность его использования для оперативной диагностики исправности приборов и систем отопления.

Литература

1. Зонина А. Д., Черепанов В. Я. Исследование неразрушающего метода измерений тепловой мощности отопительных приборов // ГЕО-Сибирь-2010: Сб. матер. VI Междунар. науч. конгр. Новосибирск: СГТА, 2010. Т. 5. Ч. 2. С. 124—251.
2. Пат. 2124188 РФ. Теплосчетчик-расходомер / С. С. Баталов, В. Я. Черепанов // Изобретения. 1998. № 36.

Результаты измерений тепловой мощности тремя методами

$T, ^\circ\text{C}$	Энтальпийный метод			Прямой метод		Неразрушающий теплотрический метод			
	$K_S, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$P_1, \text{Вт}$	$q, \text{Вт}/\text{м}^2$	$P_2, \text{Вт}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$q_0, \text{Вт}/\text{м}^2$	$P_3, \text{Вт}$
40	4180	992	15	133	14,5	0,031	0,071	98	13,5
50	4181	988	24,4	208	22,7	0,063	0,116	193	21,3
60	4185	983	43	390	42,5	0,091	0,205	305	41,2
70	4190	978	64	553	60,3	0,132	0,306	402	55,9

3. **Герашенко О. А.** Основы теплотметрии. Киев: Наукова думка, 1971.

4. **Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.** Теплопередача: Учеб. пособие. М.: Энергия, 1975.

5. **Зонова А. Д., Черепанов В. Я.** Исследование теплотметрического метода неразрушающего контроля параметров теплоносителя в системах теплоснабжения // Сб. матер. VII Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2011». Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5. Ч. 2. С. 247—251.

6. **Вихарева Н. А. и др.** Разработка и исследование новых методов и эталонных средств метрологического обеспечения теплотметрии // Приборы. 2012. № 10(148). С. 1—8.

7. **Зонова А. Д., Черепанов В. Я.** Методика экспресс-измерений тепловой мощности отопительных приборов неразрушающим методом // Сб. матер. VIII Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012». Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 5. Ч. 2. С. 158—163.

8. **Зонова А. Д.** Экспериментальные исследования теплотметрического метода и прибора для измерений параметров теплоносителя // Вестник СГГА (Новосибирск). 2012. Вып. 3(19). С. 116—123.

9. **Краснов В. А.** Теплотметрический метод определения тепловой энергии в судовых теплообменных системах // Вестник АГТУ (Астрахань). Морская техника и технология. 2010. № 1. С. 136—140.

10. **Зонова А. Д., Краснов В. А., Черепанов В. Я.** Теплотметрические метод и средства измерений параметров теплоносителя // Приборы. 2013. № 7(157). С. 1—7.

11. **Зонова А. Д., Черепанов В. Я.** Анализ источников погрешности измерений параметров теплоносителя неразрушающим теплотметрическим методом // Сб. матер. IX Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013»: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013». Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. С. 46—51.

Дата принятия 29.11.2013 г.

621.12.24

Исследование теплопроводности, теплоемкости, энтальпии сплавов с эффектами памяти системы Cu-Mn в широком интервале температур

М. М. САФАРОВ*, Х. С. САДЫКОВ, С. Г. РИЗОВЕВ*****

* Филиал московского энергетического института (национального исследовательского университета), Душанбе, Таджикистан, e-mail: mahmad1@list.ru

** Таджикский технический университет им. акад. М. С. Осими, Душанбе, Таджикистан

*** Дангаринский государственный университет, Дангара, Таджикистан

Приведены результаты исследования теплопроводности, теплоемкости и энтальпии сплава с эффектом памяти системы Cu—Mn в зависимости от температуры 300—1550 K и концентрации Mn от 0 до 100 %. В процессе обработки экспериментальных данных получены эмпирические уравнения.

Ключевые слова: теплопроводность, теплоемкость, энтальпия, сплавы с эффектом памяти, метод монотонного разогрева.

The results of thermal conductivity, heat capacity and enthalpy of alloys with memory of the system Cu—Mn effect depending from temperature 300—1550 K and concentrations of Mn from 0 to 100 % are presented. During the processing of experimental data a number of empirical equations is obtained.

Key words: thermal conductivity, heat capacity, enthalpy, alloys with memory effect, monotonic heating method.

Исследования теплопроводности λ и энтальпии H сплавов с эффектами памяти системы Cu—Mn в широком интервале температур T направлены на уточнение зависимости $\lambda = f(T)$. Для развития теории жидких металлов большое значение имеют экспериментальные исследования теплофизических свойств металлов в области высоких температур и импульсных давлений. Цель работы — получение достоверных экспериментальных данных о λ и H указанных сплавов и составление уравнения для их расчета. Измерения λ выполняли на установке, реализующей метод монотонного разогрева [1, 2]. Образцы имели цилиндрическую форму. Относи-

тельные погрешности измерений λ и теплоемкости с при доверительной вероятности 0,95 составляли соответственно 4,5 и 3,2 %. Установку градуировали по меди и алюминию, используя значения их λ , приведенные в [3], по методике, изложенной в [4].

Поглощенную энергию и электрическое сопротивление сплавов измеряли на проволочных образцах в процессе их импульсного нагревания электрическим током i большой плотности. Использовали проволоку диаметром $2a = 0,1...0,2$ мм, плотность тока в импульсе составляла $j = i/(\pi a)^2 = (1...5) \cdot 10^6$ А/см² при длительности $\tau = 10^{-4}...10^{-5}$ с. Благодаря быстрому вве-