

## Современные теплосчетчики: пути повышения точности вычисления тепловой энергии

авторы: Лежоев Р. С., Ефремов В.Е., НПП «Измерительные Технологии»

Пределы относительной погрешности вычисления тепловой энергии в теплосчетчиках определены стандартами [1, 2, 3] и составляют

$$E_C = \pm (0,5 + \Delta t_{min} / \Delta t) \%, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – разность температур теплоносителя прямого  $t1$  и обратного  $t2$  потоков системы теплоснабжения, а минимальное значение рабочего диапазона измеряемой разности температур теплосчетчика  $\Delta t_{min}$  выбирается из ряда 1, 2, 3, 5 и 10 °С, при рекомендованном значении 3 °С. Стандарт [3] регламентирует эту погрешность в неявном виде, чем достигается некоторая прикладная гибкость: за счет применения более точного вычислителя позволительно снизить требования к точности датчиков температуры и наоборот.

Характер выражения (1) таков, что допустимое значение относительной погрешности тепловычислителя имеет тенденцию к росту со снижением разности температур, и при минимальном перепаде температур максимально и не должно превышать  $\pm 1,5\%$ , а при большом ( $\Delta t \gg \Delta t_{min}$ ) не должно превышать  $0,5\%$ .

Реальная погрешность тепловычислителя в зависимости от разности температур на входе и выходе объекта теплоснабжения и точности вычисления энтальпии определяется выражением

$$E_h = [(h(t1,p1)-h(t2,p2)) / (h0(t1,p1)-h0(t2,p2)) - 1] \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $h0(t,p)$  и  $h(t,p)$  – соответственно образцовое и рассчитанное в теплосчетчике значения энтальпии при температуре  $t$  и давлении  $p$  прямого 1 и обратного 2 потоков.

Источником фундаментальных формул для вычисления энтальпии и основой для создания всех иных официально признанных таблиц и вычислительных ресурсов, является формуляция IF-97, принятая на международном форуме теплофизиков-теоретиков. Все таблицы и вычислительные ресурсы (программы) являются вторичными по отношению к формуляции IF-97 и отличаются точностью реализации исходных вычислений.

В настоящее время в СНГ действует таблица энтальпий ГСССД 2000-го года редакции [4], фрагмент которой, ограниченный диапазоном функционирования теплосчетчиков, приведен ниже в табл. 1. Методика расчета IF-97 и более подробные по сравнению с [4] таблицы имеются в книге [5]. Интернет ресурс [7] содержит все исходные документы IF-97, описание методики вычислений, а также действующий on-line калькулятор, имеющий все необходимые международные и российские сертификаты. Особенностью программы [7] является расчет значений энтальпии для произвольных значений температуры и давления и представление результата с высокой точностью, достаточной для реализации последующих аппаратно-ориентированных аппроксимаций.

Табл. 1. Значения энтальпии по ГСССД 187-99, кДж/кг

p, МПа	t, °C						
	0	25	50	75	100	125	150
0,101325	0,06±0,01	104,92±0,07	209,42±0,10	314,08±0,11	—	—	—
0,5	0,47±0,01	105,29±0,10	209,76±0,16	314,40±0,16	419,47±0,20	525,26±0,33	632,2±0,5
1,0	0,98±0,01	105,75±0,12	210,19±0,19	314,81±0,28	419,84±0,33	525,60±0,35	632,5±0,5
2,5	2,50±0,01	107,14±0,15	211,49±0,19	316,02±0,28	420,97±0,33	526,64±0,4	633,4±0,5
5,0	5,03±0,03	109,45±0,16	213,64±0,19	318,03±0,28	422,85±0,33	528,37±0,4	635,0±0,5

Погрешности значений энтальпии, полученные в результате таких расчетов, выражаются в виде абсолютной погрешности табличных значений [4] (подобно приведенным в табл. 1) или в виде относительной погрешности  $\pm 0,2...0,3\%$ , как это показано на фазовой диаграмме в книге [5] для изобарной теплоемкости. При этом отдельно оговаривается, что данные погрешности не имеют статистического смысла. Последнее создает определенные трудности в оценке погрешности расчета тепловой энергии, поскольку значительная относительная погрешность вычисления энтальпии получается за счет малой разницы энтальпий при малом перепаде температуры. Если рассчитать погрешность разности энтальпий при близких температурах ( $\Delta t = 1...3$  °C) как сумму их абсолютных погрешностей (см. табл. 1), и отнести ее к значению этой разности – вполне можно прийти к оценкам относительной погрешности порядка 2...5%. Однако, полученные таким образом оценки погрешности вычисления явно завышены: зависимость энтальпии от температуры представляет собой гладкую функцию, поэтому при сокращении разницы температур возможные отклонения разницы энтальпий также уменьшаются. Правда, непосредственное применение таблиц [5] для вычисления энтальпий ограничено высокой погрешностью от дискретности (0,1 кДж/кг), что создает значительную погрешность расчета тепла: до 1% при перепаде температур 3°C (разность энтальпий до 13 кДж/кг) и до 3% при 1°C (разность энтальпий до 4,3 кДж/кг).

Таблица [4] в диапазоне значений температур и давлений, обычных для работы теплосчетчиков, имеет очень большой шаг (25°C по температуре), что делает ее неудобной для выполнения точной интерполяции. Более того – наличие всего только семи ступеней изменения температуры подталкивает разработчиков к использованию простых полиномиальных аппроксимаций 6-ой степени, дающих практически идеальное совпадение в узлах табл. 1. При этом даже очень большие погрешности, часто возникающие при промежуточных температурах, недоступны формальному контролю из-за отсутствия согласованных промежуточных значений.

Примером такой интерполяции является методика-рекомендация МИ 2412-97 [8]. Погрешность ее вычислений оценена разработчиками рекомендации в  $\pm 0,2\%$  (среднеквадратическое отклонение  $\pm 0,07\%$ ) относительно табличных данных ГСССД (без

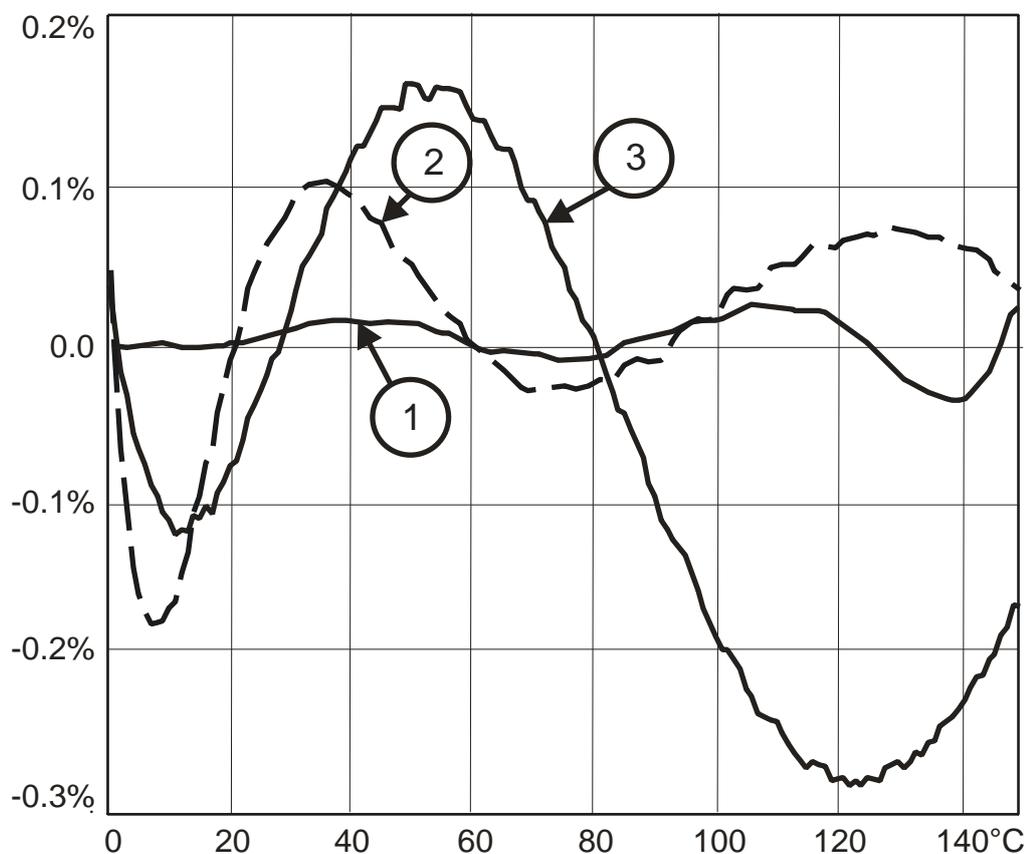
указания конкретного источника и даты его издания), а для отдельных точек приведены фантастически низкие погрешности 0...0,01...0,02%. К сожалению, обнаружить источник приведенных в МИ 2412-97 «образцовых значений ГСССД» авторам статьи не удалось. Энтальпия, рассчитанная по аппроксимации МИ 2412-97, в диапазоне 70...92°C отклоняется от таблиц [5] вверх на 0,13 кДж/кг, а в диапазоне 120...150°C – вниз на 0,2...0,5 кДж/кг, систематически, без всякого статистического смысла, а значит, и параметр среднеквадратического отклонения здесь неуместен. Только вследствие гладкости функции аппроксимации расчет энтальпии по этой методике обеспечивает погрешность расчета энергии в пределах  $\pm 0,3\%$  (относительно таблиц ГСССД) при перепаде температур 1, 2, 3, 5, 10 °C и более – независимо от перепада температур. Естественно, эта дополнительная погрешность суммируется с базовой погрешностью вычисления энтальпии по формуляции IF-97 [5], в результате чего суммарная оценка погрешности вычисления тепловой энергии достигает 0,5% и едва вписывается в действующие нормы. Таким образом, получившая широкое распространение при создании теплосчетчиков методика-рекомендация МИ 2412-97, как источник готового решения при построении программного обеспечения тепловычислителей, ухудшает исходную табличную интерполяцию в 2,5 раза.

В то же время непосредственная реализация методики вычисления энтальпии по формуляции IF-97 [5], [7] вполне может устранить возникновение сколько-нибудь значительной дополнительной погрешности вычисления энтальпий. Однако ее буквальная реализация в электронных теплосчетчиках затруднена громоздкостью вычисления энергии Гиббса и численного решения дифференциальных уравнений по формуляции IF-97 – необходимо применять аппроксимации.

Конечно, погрешность функции аппроксимации таблиц ГСССД может быть заметно снижена, например, до  $\pm 0,05\%$ . В этом случае погрешность вычисления тепловой энергии в теплосчетчике может остаться в пределах  $\pm 0,3\%$ . Если производитель конкретного тепловычислителя заявляет, что погрешность вычисления тепловой энергии в его приборе не превышает  $\pm 0,1\%$  (а есть случаи подобных заявлений о 0,01%, и 0,001%), то на самом деле идет речь только о погрешности воспроизведения **ПОГРЕШНОСТЕЙ** конкретной реализации методики IF-97 (например, ГСССД 187-99, ГСССД Р-776-98, ГСССД 98-86, МИ 2412-97 или др.). Но без указания точного наименования конкретной реализации методики IF-97 такие оценки погрешности вычисления вообще теряют смысл.

На рис. 1 для примера приведены зависимости погрешности вычисления тепловой энергии от температуры для различных аппроксимаций (по отношению к расчетным данным формуляции IF-97, полученным в [7]): 1 – аппроксимация в разработанном при участии авторов тепловодосчетчике X12 [9]; 2 – по данным ГСССД 98-86 [6]; 3 – аппроксимация по

методике МИ 2412-97 [8]. Все кривые даны для перепада температур  $\Delta t_{min}=3\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давления 1 МПа, но и при давлениях 0,1...5 МПа и перепадах температур  $\Delta t_{min}=1...10\text{ }^{\circ}\text{C}$  изменение



значений и формы отклонений – весьма незначительны.

Рисунок 1

Величина абсолютной погрешности аппроксимации [9] авторов статьи по отношению к уже упомянутым данным [7] в диапазонах изменения температур от 0 до 175  $^{\circ}\text{C}$  и давлений до 5 МПа не превышает  $\pm 0.02$  кДж/кг, а относительная погрешность вычисления тепловой энергии при разности температур  $1^{\circ}\text{C}$  и более не выходит за пределы  $\pm 0,05\%$ , в том числе и в самой критичной для погрешности зоне с нормативными пределами  $\pm 1,5\%$  [1, 2, 3].

#### Литература

1. ГОСТ Р EN 1434-1: 2006. Теплосчетчики. Часть 1. Общие требования
2. ДСТУ EN 1434-1:2006. Теплолічильники. Частина 1. Загальні вимоги
3. ГОСТ Р 51649-2000. Теплосчетчики для водяных систем теплоснабжения. Общие технические условия
4. ГСССД 187-99. Александров А. А., Григорьев Б. А. Вода. Удельный объем и энтальпия при температурах 0...1000 $^{\circ}\text{C}$  и давлениях 0,001...1000 МПа (приняты МГС под номером 98-2000 взамен ГСССД 98-86)

5. ГСССД Р-776-98. Александров А. А., Григорьев Б. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М. – Издательство МЭИ, 2006. – 168 с.
6. ГСССД 98-86. Вода. Удельный объем и энтальпия при температурах 0...1000 град. С и давлениях 0,001...1000 МПа
7. <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/wsphb> Интернет-приложение к справочнику Александров А.А., Орлов К.А. и Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики. - М.: Издательство МЭИ. 2009
8. Рекомендация МИ 2412-97. Водяные системы теплоснабжения. Уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя
9. [www.measure.com.ua/x12/calculator.php](http://www.measure.com.ua/x12/calculator.php) Интернет-ресурс НПП «Измерительные технологии»