Госстандарт России

Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологической службы
(ВНИИМС)

Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологии им. Д.И. Менделеева
(ВНИИМ им. Д.И. Менделеева)

РЕКОМЕНДАЦИЯ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

ПАРОВЫЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ И КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

МИ 2451-98

Москва
1998 г.

gost.e-ecolog.ru

Госстандарт России

Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологической службы
(ВНИИМС)

Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологии им. Д.И. Менделеева
(ВНИИМ им. Д.И. Менделеева)

РЕКОМЕНДАЦИЯ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

ПАРОВЫЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ И КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

МИ 2451-98

Москва
1998 г.

РАЗРАБОТАНА Всероссийским научно-исследовательским институтом метрологической службы (ВНИИМС), Всероссийским научно-исследовательским институтом метрологии им. Д.И.Менделеева (ВНИИМ им. Д.И.Менделеева)

ИСПОЛНИТЕЛИ Беляев Б.М., к.т.н.;
Лисенков А.И., к.т.н., (рук. темы);
Походун А.И., д.т.н.;
Мишустин В.И., к.т.н.;
Лачков В.И.;

УТВЕРЖДЕНА

ВНИИМС	1997 г.
ВНИИМ им. Д.И.Менделеева	1997 г.

Настоящая рекомендация не может быть полностью или частично воспроизведена, тиражирована и распространена без разрешения ВНИИМС.

Группа Т80

Рекомендация ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ Паровые системы теплоснабжения. Уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя	МИ 2451-98

Введена в действие с 01.02.1998 г.

Настоящая рекомендация устанавливает уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя при проведении учета их отпуска и потребления в паровых системах теплоснабжения.

Рекомендация предназначена для использования при разработке средств измерений, методик выполнения измерений и схем узлов учета тепловой энергии и теплоносителя.

В рекомендациях использованы многие положения из МИ 2412, регламентирующие уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя водяных систем теплоснабжения.

1. Общие положения

1.1. Рекомендация охватывает измерения (определения) величин, которые являются исходными для осуществления учета тепловой энергии и теплоносителя при взаиморасчетах энергоснабжающей организации с потребителем.

1.2. При измерении тепловой энергии применяют косвенные измерения, при которых тепловую энергию определяют на основании из-

мерений расхода (массового или объемного) или количества (массы или объема) теплоносителя, температуры и (или) давления теплоносителя.

Измерение тепловой энергии может осуществляться с учетом или без учета тепловой энергии холодной воды.

1.3. При измерении тепловой энергии и количества теплоносителя применяют регламентированные в нормативно-технических документах (НТД) методы измерений расхода, количества, температуры и давления теплоносителя.

1.4. Теплофизические свойства теплоносителей принимают соответствующими НТД ГСССД или другим утвержденным в установленном порядке нормативным документам, регламентирующим эти свойства.

2. Уравнения измерений

2.1. Приведенные уравнения являются исходными для разработки алгоритмов измерений, применяемых в средствах измерений, методиках выполнения измерений и схемах узлов учета тепловой энергии. Отклонение от указанных уравнений обуславливает методическую погрешность, которую необходимо оценивать при утверждении типа средств измерений тепловой энергии, аттестации конкретных методик выполнения измерений и проектировании узлов учета тепловой энергии.

2.2. Тепловую энергию Q на источнике тепловой энергии по каждому выводу (двухтрубной магистрали) определяют по формуле:

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_1 \cdot h_1 \cdot d\tau - \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_2 \cdot h_2 \cdot d\tau - \int_{\tau_0}^{\tau_1} (m_1 - m_2) \cdot h_{hv} \cdot d\tau, \quad (2.1)$$

где Q - выражена в МДж;

m_1 и m_2 - массовый расход теплоносителя, соответственно, в паропроводе и конденсатопроводе, т/ч;

h_1 , h_2 и h_{hv} - энтальпия теплоносителя, соответственно, в паропроводе, конденсатопроводе и трубопроводе холодной воды, кДж/кг;

τ_0 и τ_1 - моменты времени, соответствующие началу (τ_0) и окончанию (τ_1) интервала времени измерения тепловой энергии, ч.

Энтальпию h=f(t,P) теплоносителя определяют по НТД, указанным в п.1.4 настоящей рекомендации, в соответствии с температурой t и давлением P теплоносителя. Энтальпию насыщенного водяного пара определяют по уравнениям, приведенным в справочном приложении.

2.3. Тепловую энергию на источнике тепловой энергии, имеющем несколько паропроводов и конденсатопроводов и несколько трубопроводов холодной воды, определяют по формуле (2.1), заменив интегралы на соответствующие суммы интегралов. Суммирование интегралов проводят по всем одноименным трубопроводам.

2.4. Тепловую энергию Q у потребителя по каждому вводу (двухтрубной магистрали) определяют по формуле:

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_1 \cdot h_1 \cdot d\tau - \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_2 \cdot h_2 \cdot d\tau - \int_{\tau_0}^{\tau_1} (m_1 - m_2) \cdot h_{hv} \cdot d\tau, \quad (2.2)$$

где h_{hv} - энтальпия холодной воды на источнике тепловой энергии;

остальные обозначения те же, что в п.2.2, но для теплопотребляющей установки потребителя.

2.5. Тепловую энергию, содержащуюся в теплоносителе, прошедшем по любому единичному (одному) трубопроводу или однотрубной системе, Q_{ed} , определяют по формуле

$$Q_{ed} = \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_{ed} \cdot h_{ed} \cdot d\tau - \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_{ed} \cdot h_{hv} \cdot d\tau; \quad (2.3)$$

где m_{ed} и h_{ed} - соответственно, массовый расход и энтальпия теплоносителя в любом единичном (одном) трубопроводе, независимо от его назначения;

h_{hv} - энтальпия холодной воды на источнике тепловой энергии.

2.6. По формуле (2.1...2.3) измеряют величины Q, Q_{ed} с вычитанием из них тепловой энергии холодной воды, представленной интегралами, содержащими сомножитель h_{hv}, при условии, что расход холодной воды равен разности расходов (m_1-m_2).

При этом в формулах (2.2; 2.3) h_{hv} может быть определена по принятой в установленном порядке температуре холодной воды t_{hvp} при условии оценки погрешности, обусловленной отклонением принятой температуры t_{hvp} от действительной температуры холодной воды t_{hv}.

При измерении величин Q и Q_{ed} без исключения из них тепловой энергии холодной воды, указанные величины следует определять по формулам (2.1...2.3), опуская интегралы, в подинтегральное выражение которых входит сомножитель h_{hv}.

В последнем случае уменьшается погрешность измерений тепловой энергии за счет исключения погрешности измерений тепловой энергии холодной воды и такие измерения являются предпочтительными. В этом случае, при необходимости учета тепловой энергии холодной воды, она может быть определена отдельно , например, как произведение принятого в установленном порядке среднего значения энтальпии холодной воды на источнике тепловой энергии, на массу отобранного из системы пара и конденсата. При этом должна быть оценена погрешность определения тепловой энергии холодной воды.

2.7. Количество теплоносителя (на источнике тепловой энергии и у потребителя) определяют по следующим формулам:

масса теплоносителя, прошедшая по любому единичному трубопроводу, M_{ed}

$$M_{ed} = \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_{ed} \cdot d\tau; \qquad (2.4)$$

масса теплоносителя, отобранного из тепловой сети или от источника тепловой энергии (невозвращенного на источник тепловой энергии или в тепловую сеть), $M_{от}$

$$M_{от} = \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_1 \cdot d\tau - \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_2 \cdot d\tau = \int_{\tau_0}^{\tau_1} (m_1 - m_2) \cdot d\tau; \qquad (2.5)$$

где m_1 и m_2 - массовый расход теплоносителя, соответственно, в паропроводе и конденсатопроводе на источнике тепловой энергии или у потребителя, т/ч.

2.8. В случае измерения объемного расхода q массовый расход m определяют по формуле

$$m = 10^{-3} \cdot q \cdot \rho, \qquad (2.6)$$

где ρ - плотность теплоносителя, кг/м^3;

q - объемный расход теплоносителя, м^3/ч.

Плотность ρ теплоносителя определяют по НТД, указанным в п.1.4 настоящей рекомендации, в соответствии с температурой и давлением теплоносителя.

2.9. В случае, когда по конденсатопроводу производится возврат конденсата в прерывистом режиме, измерения количества конденсата и тепловой энергии, содержащейся в конденсате, прошедшем по конденсатопроводу, можно проводить только в интервалах времени прохождения конденсата по конденсатопроводу, тогда интегралы, содержащие члены m_2h_2, представляют в виде суммы интегралов, например

$$\int_{\tau_0}^{\tau_1} m_2 \cdot h_2 \cdot d\tau = \sum_{K=0}^{N} \int_{\tau_{k0}}^{\tau_{k1}} m_2 \cdot h_2 \cdot d\tau; \qquad (2.7)$$

где τ_{k0} и τ_{k1} - моменты времени, соответствующие началу (τ_{k0}) и окончанию (τ_{k1}) k-го интервала времени, в течение которого происходит возврат конденсата по конденсатопроводу, находящегося в интервале времени τ_1-τ_0, ч;

N - количество интервалов, во время которых происходит возврат конденсата по конденсатопроводу.

2.10. При оценивании погрешности измерений тепловой энергии составляющие погрешности должны быть представлены с учетом влияния измеряемых (определяемых) расхода, температуры, давления, энтальпии, плотности теплоносителя на результат измерений тепловой энергии.

2.11. При реализации уравнений измерений (в средствах измерений, методиках выполнения измерений и схемах узлов учета тепловой энергии и теплоносителя) их, как правило, преобразовывают в соответствии с правилами математики, энтальпию h и плотность ρ определяют по соответствующим уравнениям, а интегралы заменяют на суммы.

Энтальпию h и плотность ρ теплоносителя определяют по уравнениям, приведенным в справочном приложении. Допускается в обоснованных случаях определять энтальпию h и плотность ρ теплоносителя по другим уравнениям, утвержденным в установленном порядке, имеющим оценки погрешности по сравнению с данными ГСССД.

Интегралы заменяют на соответствующие суммы, например

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_1} m \cdot h \cdot d\tau \quad \text{заменяют на} \quad \sum_{i=0}^{n} G_i \cdot h_i = \sum_{i=0}^{n} Q_i, \qquad (2.8)$$

где Q_i - тепловая энергия, соответствующая i-му интервалу времени;

Gi - значение массы теплоносителя, прошедшей через трубопровод в течение i-го интервала времени;

hi′ - энтальпия теплоносителя, соответствующая i-му интервалу времени;

n - количество интервалов времени, соответствующее времени измерения тепловой энергии от τ_0 до τ_1.

В этих случаях оценивают погрешность от замены интеграла на соответствующую сумму.

2.12. Вопрос о существенности оцениваемых погрешностей рассматривается при утверждении типа средства измерений, аттестации методики выполнения измерений, проектировании схем узлов учета тепловой энергии.

Приложение
(справочное)

УРАВНЕНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И ЭНТАЛЬПИИ ВОДЯНОГО ПАРА

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. В настоящем приложении приведены уравнения определения плотности (кг/м^3) и энтальпии (кДж/кг) перегретого водяного пара по исходным значениям температуры и абсолютного давления, насыщенного водяного пара по исходным значениям температуры и степени сухости, а также уравнение, связывающее однозначно температуру и абсолютное давление насыщения водяного пара. При этом под степенью сухости понимается отношение массы газовой фазы к общей массе насыщенного пара. Таким образом, насыщенный пар принимается сухим при степени сухости, равной 1, и влажным при степени сухости, меньшей 1.

1.2. Уравнения разработаны по заданию АОЗТ "НПФ ЛОГИКА" во Всероссийском научно-исследовательском центре по сертификации данных сырья, материалов и веществ (ВНИЦ СМВ) Государственной службы стандартных справочных данных (ГСССД) Госстандарта РФ.

1.3. Для перегретого пара уравнения справедливы в диапазоне температуры от 100 до 600 ^{0}C и абсолютного давления от 0,05 до 30,0 МПа, но при значениях абсолютного давления меньших значений давления насыщения; для насыщенного - в диапазоне температуры от 100 до 300 ^{0}C и степени сухости от 0,7 до 1.

1.4. Оценка погрешности уравнений приведена относительно данных ГСССД 98-86 для всего диапазона измерений температуры и абсолютного давления.

2. УРАВНЕНИЯ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

2.1. Плотность перегретого водяного пара определяют по формуле:

$$\rho = \frac{73{,}874969 \cdot \pi}{\tau \cdot Z}, \qquad (П.1)$$

где ρ - плотность перегретого водяного пара, кг/м^3;

τ - приведенная температура, равная: $\tau = (t+273{,}15)/647{,}14$;

π - приведенное давление, равное: $\pi = P/22{,}064$;

Z - коэффициент сжимаемости перегретого водяного пара, равный:

$$Z = 1 + \pi \cdot \left(\frac{0{,}4409392}{\tau} - \frac{1{,}386598}{\tau^2} + \frac{1{,}380501}{\tau^3} - \frac{0{,}7644377}{\tau^4} \right) +$$
$$+ \pi^2 \cdot \left(\frac{56{,}40548}{\tau} - \frac{297{,}0161}{\tau^2} + \frac{617{,}8258}{\tau^3} - \frac{634{,}747}{\tau^4} + \frac{322{,}8009}{\tau^5} - \frac{65{,}45004}{\tau^6} \right) +$$
$$+ \pi^3 \cdot \left(\frac{149{,}3651}{\tau} - \frac{895{,}0375}{\tau^2} + \frac{2123{,}035}{\tau^3} - \frac{2488{,}625}{\tau^4} + \frac{1439{,}213}{\tau^5} - \frac{327{,}7709}{\tau^6} \right) +$$
$$+ \pi^4 \cdot \left(151{,}1386 - \frac{967{,}3387}{\tau} + \frac{2478{,}739}{\tau^2} - \frac{3178{,}106}{\tau^3} + \frac{2038{,}512}{\tau^4} - \frac{523{,}2041}{\tau^5} \right);$$

t - температура, ^{0}C;

P - абсолютное давление, МПа.

Среднеквадратическая оценка относительной погрешности σ на диапазоне определенной плотности ρ перегретого водяного пара не выходит за пределы: ±0,02%.

Максимальное значение относительной погрешности δ на диапазоне определений плотности ρ перегретого водяного пара не выходит за пределы: ±0,10 %.

2.2. Энтальпию перегретого водяного пара определяют по формуле:

$$h=\left(10258{,}8-\frac{20231{,}3}{\tau}+\frac{24702{,}8}{\tau^2}-\frac{16307{,}3}{\tau^3}+\frac{5579{,}31}{\tau^4}-\frac{777{,}285}{\tau^5}\right)+$$
$$+\pi\cdot\left(-\frac{355{,}878}{\tau}+\frac{817{,}288}{\tau^2}-\frac{845{,}841}{\tau^3}\right)-\pi^2\cdot\left(\frac{160{,}276}{\tau^3}\right)+$$
$$+\pi^3\cdot\left(-\frac{95607{,}5}{\tau}+\frac{443740}{\tau^2}-\frac{767668}{\tau^3}+\frac{587261}{\tau^4}-\frac{167657}{\tau^5}\right)+$$
$$+\pi^4\cdot\left(\frac{22542{,}8}{\tau^2}-\frac{84140{,}2}{\tau^3}+\frac{104198{,}0}{\tau^4}-\frac{42886{,}7}{\tau^5}\right),$$

(П.2)

где h - энтальпия перегретого водяного пара, кДж/кг;
τ - приведенная температура, равная $\tau=(t+273{,}15)/647{,}14$;
t - температура, ^{0}C;
π - приведенное давление, равное: $\pi=P/22{,}064$;
P - абсолютное давление, МПа.

Среднеквадратическая оценка относительной погрешности σ на диапазоне определений энтальпии h перегретого водяного пара не выходит за пределы: ±0,02%.

Максимальное значение относительной погрешности δ на диапазоне определений энтальпии h перегретого водяного пара не выходит за пределы: ±0,09%.

3. УРАВНЕНИЯ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА.

3.1. Плотность насыщенного водяного пара определяют по формуле:

$$\rho = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2 \cdot (1 - X) + \rho_1 \cdot X}, \qquad (П.3)$$

где ρ - плотность насыщенного водяного пара, кг/м^3;

ρ_1 - плотность жидкой фазы насыщенного водяного пара, кг/м^3, равная:

$$\rho_1 = 322{,}0 \cdot \left(1{,}0 + 1{,}99053 \cdot \xi^{1/3} + 1{,}10609 \cdot \xi^{2/3} - 0{,}524484 \cdot \xi^{5/3} - 2{,}1873 \cdot \xi^{17/3} - \right.$$
$$\left. - 498{,}405 \cdot \xi^{58/3}\right)$$

ρ_2 - плотность газовой фазы насыщенного водяного пара, кг/м^3, равная :

$$\rho_2 = 322{,}0 \cdot \exp\left(- 2{,}02957 \cdot \xi^{2/6} - 2{,}68781 \cdot \xi^{4/6} - 5{,}38107 \cdot \xi^{8/6} - 17{,}3151 \cdot \xi^{18/6} - \right.$$
$$\left. - 44{,}6384 \cdot \xi^{37/6} - 64{,}3486 \cdot \xi^{71/6} \right)$$

X - степень сухости насыщенного водяного пара, кг/кг;

ξ - переменная, равная: $\xi = 1 - \tau$;

exp - функция e в степени, где e - основание натурального логарифма;

τ - приведенная температура, равная $\tau = (t + 273{,}15)/647{,}14$;

t - температура, ^{0}C.

Среднеквадратическая оценка относительной погрешности σ на диапазоне определений плотности ρ насыщенного водяного пара не выходит за пределы: ±0,05%.

Максимальное значение относительной погрешности δ на диапазоне определений плотности ρ насыщенного водяного пара не выходит за пределы: ±0,10%.

3.2. Энтальпию насыщенного водяного пара определяют по формуле:

$$h = h_1 \cdot (1 - X) + h_2 \cdot X, \qquad (П.4)$$

где h - энтальпия насыщенного водяного пара, кДж/кг;

h_1 - энтальпия жидкой фазы насыщенного водяного пара, кДж/кг, равная:

$$h_1 = -4335{,}63 \cdot \tau + 16470 \cdot \tau^2 - 17449{,}2 \cdot \tau^3 + 7131{,}31 \cdot \tau^4;$$

h_2 - энтальпия газовой фазы насыщенного водяного пара, кДж/кг, равная:

$$h_2 = 2149{,}17 + 15049{,}8 \cdot \tau^3 - 38597{,}1 \cdot \tau^4 + 38206{,}2 \cdot \tau^5 - 14351{,}7 \cdot \tau^6;$$

X - степень сухости насыщенного водяного пара, кг/кг;

τ - приведенная температура, равная $\tau=(t+273{,}15)/647{,}14$;

t - температура, ^{0}C.

Среднеквадратическая оценка относительной погрешности σ на диапазоне определений энтальпии h насыщенного водяного пара не выходит за пределы: ±0,015%.

Максимальное значение относительной погрешности δ на диапазоне определений энтальпии h насыщенного водяного пара не выходит за пределы: ±0,03%.

4. УРАВНЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА

4.1. Абсолютное давление насыщенного водяного пара определяют по формуле:

$$P_s = 22{,}064 \exp \frac{-7{,}85823\xi + 1{,}8399\xi^{1,5} - 11{,}781\xi^{3} + 22{,}6705\xi^{3,5} - 15{,}9393\xi^{4} + 1{,}77516\xi^{7,5}}{\tau_s}$$

(П.5)

где

P_S - абсолютное давление насыщения водяного пара, МПа;

exp - функция *e* в степени, где *e* - основание натурального логарифма;

ξ - переменная, равная $\xi = 1 - \tau s$;

τs - приведенная температура насыщения водяного пара, равная:

$$\tau s = (ts + 273{,}15)/647{,}14;$$

ts - температура насыщения водяного пара, ^{0}C.

gost.e-ecolog.ru