

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.

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.

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

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:

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

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;  
 $\tau_0$  и  $\tau_1$  - моменты времени, соответствующие началу ( $\tau_0$ ) и окончанию ( $\tau_1$ ) 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,  $M_{ed}$

$$\dot{M}_{ed} = \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_{ed} \cdot d\tau; \quad (2.4)$$

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

$$M_{от} = \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_1 \cdot dt - \int_{\tau_0}^{\tau_1} m_2 \cdot dt = \int_{\tau_0}^{\tau_1} (m_1 - m_2) \cdot dt; \quad (2.5)$$

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

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

где  $\rho$  - плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  
 $q$  - объемный расход теплоносителя, м<sup>3</sup>/ч.

Плотность  $\rho$  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  $m_2 h_2$ , представляют в виде суммы интегралов, например

$$\int_{\tau_0}^{\tau_1} m_2 \cdot h_2 \cdot dt = \sum_{k=0}^N \int_{\tau_{k0}}^{\tau_{k1}} m_2 \cdot h_2 \cdot dt; \quad (2.7)$$

где  $\tau_{k0}$  и  $\tau_{k1}$  - моменты времени, соответствующие началу ( $\tau_{k0}$ ) и окончанию ( $\tau_{k1}$ )  $k$ -го интервала времени, в течение которого происходит возврат конденсата по конденсатопроводу, находящегося в интервале времени  $\tau_1 - \tau_0$ , 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  $\rho$  определяют по соответствующим уравнениям, а интегралы заменяют на суммы.

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

Интегралы заменяют на соответствующие суммы, например

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

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

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

$h_i$  - энтальпия теплоносителя, соответствующая  $i$ -му интервалу времени;

$n$  - количество интервалов времени, соответствующее времени измерения тепловой энергии от  $\tau_0$  до  $\tau_1$ .

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.

## УРАВНЕНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И ЭНТАЛЬПИИ ВОДЯНОГО ПАРА

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. В настоящем приложении приведены уравнения определения плотности ( $\text{кг/м}^3$ ) и энтальпии ( $\text{кДж/кг}$ ) 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  $^{\circ}\text{C}$  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  $^{\circ}\text{C}$  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:

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

где  $\rho$  - плотность перегретого водяного пара, кг/м<sup>3</sup>;

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

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

$Z$  - коэффициент сжимаемости перегретого водяного пара, равный:

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

$t$  - температура, °С;

$P$  - абсолютное давление, МПа.

Среднеквадратическая оценка относительной погрешности  $\sigma$  на диапазоне определенной плотности  $\rho$  перегретого водяного пара не выходит за пределы:  $\pm 0,02\%$ .

Максимальное значение относительной погрешности  $\delta$  на диапазоне определений плотности  $\rho$  перегретого водяного пара не выходит за пределы:  $\pm 0,10\%$ .

2.2. Энтальпию перегретого водяного пара определяют по формуле:

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

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

Среднеквадратическая оценка относительной погрешности  $\sigma$  на диапазоне определений энтальпии  $h$  перегретого водяного пара не выходит за пределы:  $\pm 0,02\%$ .

Максимальное значение относительной погрешности  $\delta$  на диапазоне определений энтальпии  $h$  перегретого водяного пара не выходит за пределы:  $\pm 0,09\%$ .

### 3. УРАВНЕНИЯ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА.

3.1. Плотность насыщенного водяного пара определяют по формуле:

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

где  $\rho$  - плотность насыщенного водяного пара, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_1$  - плотность жидкой фазы насыщенного водяного пара, кг/м<sup>3</sup>,  
равная:

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

$\rho_2$  - плотность газовой фазы насыщенного водяного пара, кг/м<sup>3</sup>,  
равная :

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

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

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

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

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

$t$  - температура, °C.

Среднеквадратическая оценка относительной погрешности  $\sigma$  на диапазоне определений плотности  $\rho$  насыщенного водяного пара не выходит за пределы:  $\pm 0,05\%$ .

Максимальное значение относительной погрешности  $\delta$  на диапазоне определений плотности  $\rho$  насыщенного водяного пара не выходит за пределы:  $\pm 0,10\%$ .

3.2. Энтальпию насыщенного водяного пара определяют по формуле:

$$h = h_1 \cdot (1 - X) + h_2 \cdot X, \quad (\text{П.4})$$

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;

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

$t$  - температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

Среднеквадратическая оценка относительной погрешности  $\sigma$  на диапазоне определений энтальпии  $h$  насыщенного водяного пара не выходит за пределы:  $\pm 0,015\%$ .

Максимальное значение относительной погрешности  $\delta$  на диапазоне определений энтальпии  $h$  насыщенного водяного пара не выходит за пределы:  $\pm 0,03\%$ .

#### 4. УРАВНЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА

4.1. Абсолютное давление насыщенного водяного пара определяют по формуле:

$$P_s = 22,064 \exp \frac{-7,8582\xi + 1,8399\xi^{1,5} - 11,781\xi^3 + 22,670\xi^{3,5} - 15,939\xi^4 + 1,7751\xi^{7,5}}{\tau_s}$$

(П.5)

где

$P_s$  - абсолютное давление насыщения водяного пара, МПа;

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

$\xi$  - переменная, равная  $\xi = 1 - \tau_s$ ;

$\tau_s$  - приведенная температура насыщения водяного пара, равная:

$$\tau_s = (t_s + 273,15) / 647,14;$$

$t_s$  - температура насыщения водяного пара,  $^{\circ}\text{C}$ .