
ИНЖЕНЕРНО-ВНЕДРЕНЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«КРЕЙТ»

Теплоэнергоконтроллер ТЭКОН-17

Алгоритмы расчета

Вода, водяной пар, природный газ

T10.06.52 РР



Екатеринбург

2007

Редакция 21.00 от 18.06.2007
© ИВП КРЕЙТ, 2000-2007г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ВВОД И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ СИГНАЛОВ С ДАТЧИКОВ	5
1.1 ПОРЯДОК ВВОДА СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ.....	5
1.1.1 Аналоговые датчики	5
1.1.2 Частотные датчики	6
1.1.4 Числоимпульсные датчики	6
1.1.5 Режимы поверки	7
1.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	8
1.2.1 Общие принципы.....	8
1.2.2 Перепад давления	9
1.2.3 Давление.....	9
1.2.4 Расход	9
1.2.5 Измерение температуры терморезистором	10
1.2.6 Измерение температуры термопарой	11
1.2.7 Прочие датчики с линейной шкалой	13
1.2.8 Вводимые датчики.....	13
1.2.9 Расход электроэнергии	13
1.3 СОГЛАСОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ И ДАТЧИКОВ.....	14
1.3.1 Использование датчика перепада	14
1.3.2 Вычисление абсолютного и избыточного давления	14
1.3.3 Температура.....	15
2 ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСХОДОМЕРНОГО УЗЛА	16
2.1 ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ДИАМЕТР СУ	16
2.2 КОЭФФИЦИЕНТ ИСТЕЧЕНИЯ	17
2.3 КОЭФФИЦИЕНТ СКОРОСТИ ВХОДА	17
2.4 КОЭФФИЦИЕНТ ПРИТУПЛЕНИЯ.....	17
2.5 КОЭФФИЦИЕНТ ПОПРАВКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ.....	17
3 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ	19
3.1 ПСЕВДОКРИТИЧЕСКИЕ И ПРИВЕДЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ.....	19
3.2 ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ.....	19
3.3 ПЛОТНОСТЬ В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ	21
3.4 ПОКАЗАТЕЛЬ АДИАБАТЫ	21
3.5 КОЭФФИЦИЕНТ РАСШИРЕНИЯ	22
3.6 КОЭФФИЦИЕНТ СЖИМАЕМОСТИ	22
4 РАСЧЕТ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО РАСХОДА.....	24
4.1 ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКА ПЕРЕПАДА	24
4.1.1 Общий порядок расчетов.....	24
4.1.2 Расчет модифицированного числа Рейнольдса	24
4.1.3 Действительный мгновенный расход.....	24
4.2 ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКА РАСХОДА	25
4.2.1 Датчики с аналоговым и частотным выходом	25
4.2.2 Числоимпульсные датчики.....	25
5 РАСЧЕТ МГНОВЕННОЙ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ	27
5.1 ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭНТАЛЬПИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ.....	27
5.2 ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ.....	28
6 ПРОЧИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ.....	29
6.1 СРЕДНИЕ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ	29
6.2 РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	30
6.2.1 Расчет стоимости	30
6.2.2 Определение дня недели	31
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий документ содержит сведения обо всех расчетных формулах, применяемых в теплоэнергоконтроллере ТЭКОН-17 (далее по тексту ТЭКОН) при вводе информации с датчиков, ее преобразовании, вычислении и накоплении расхода и количества тепловой энергии в трубопроводах.

В документе описан способ расчета расхода и количества тепловой энергии для следующих сред:

- вода,
- пар перегретый (сухой),
- пар насыщенный (сухой),
- газ природный (сухой),
- газ технический с вводимыми характеристиками.

Расход вычисляется как с использованием датчиков расхода, так и использованием датчиков перепада давления на сужающем устройстве (СУ). Для ТЭКОН в качестве СУ может служить только диафрагма.

При включении в состав программного обеспечения ТЭКОН модуля расчета конкретных технических газов и жидкостей выпускается дополнительная документация на способ расчета.

При применении стандартных формульных зависимостей в тексте сделаны ссылки на номер источника согласно перечню ссылочной документации, и, в ряде случаев, на конкретный номер формулы в нем.

Сокращенные названия отдельных конструктивных модулей ТЭКОН используются согласно «Руководству по эксплуатации ТЭКОН» [1].

Данный документ соответствует версии алгоритмов расчета 21.0 и версии программы не ниже 40.00.

1 ВВОД И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ СИГНАЛОВ С ДАТЧИКОВ

1.1 Порядок ввода сигналов датчиков

1.1.1 Аналоговые датчики

1.1.1.1 Аналоговые датчики обрабатываются в три этапа. На первом этапе выполняется непосредственно аналого-цифровое преобразование выбранного сигнала с помощью аппаратуры модулей МИ и МКН.

1.1.1.2 В ТЭКОН применен измерительный модуль МИ, содержащий «сигма-дельта АЦП» с перестраиваемым коэффициентом усиления и временем преобразования (с учетом калибровки) от 20 до 180 мс. Поскольку число аналоговых каналов может быть большим, до 64, в любом режиме работы вводятся лишь те из них, которые связаны с датчиками, описанными как аналоговые. Полный цикл измерения всех датчиков может достигать 10 секунд.

1.1.1.3 Второй этап выполняется также во всех режимах работы ТЭКОН, один раз в каждом цикле работы основной программы (составляет от 2 до 30 секунд в зависимости от числа и типа описанных датчиков и трубопроводов). В нем для всех введенных за время данного цикла датчиков с номерами «j» производится преобразование сигнала в число с плавающей точкой, изображающее реальное входное напряжение датчика в милливольтмах U_j . Для снижения уровня шумов выполняется дополнительная цифровая обработка – усреднение сигнала по последним 4 замерам, причем те из них, на которых было зафиксировано переполнение АЦП, игнорируются. Значения сигнала датчиков в милливольтмах помещаются в массив мгновенных значений сигналов $U_{дат}(j)$ и индицируются как параметр «сигнал датчика».

В специальном режиме проверки запись информации в этот массив от АЦП блокируется. Данные в него могут быть занесены вручную для оценки точности работы последующих алгоритмов расчета.

1.1.1.4 Значение входного напряжения аналогового датчика с номером «j», подключенного к измерительному каналу с номером «i», в общем случае вычисляется по формуле:

$$U_j = (Z_i - Z_0) * U_d / K_n - D_{kn} - D_i, \quad (1.1)$$

где

U_j – напряжение датчика «j», мВ

Z_i – двоичный код АЦП на канале «i»

Z_0 – двоичный код АЦП на канале измерения нуля при том же K_n

U_d – цена младшего разряда кода АЦП, равная 2.5 мВ

K_n – реальный коэффициент усиления ступени «n» АЦП

D_{kn} – поправка смещения на коэффициент усиления K_n , мВ

D_i – поправка на канал «i», мВ.

1.1.1.6 Третий этап, вычисление измеренной любым датчиком физической величины, выполняется основной программой только в режиме РАБОТА. Для этого в зависимости от типа датчика вычисляется либо измеренный сигнал тока или напряжения в относительных единицах, либо величина измеренного сопротивления.

- Для токовых датчиков первоначально определяется реальный ток датчика, мА

$$I_{дат} = U_{дат} / R_{дат}, \quad (1.2)$$

где $R_{дат}$ – номинальное значение сопротивления токовых резисторов, Ом.

Является заводской константой, близкой к 100 Ом.

$U_{дат}$ – входной сигнал с датчика, мВ,

затем сигнал переводится в относительные единицы

$$I_o = (I_{дат} - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}), \quad (1.3)$$

где

$$I_{max} = \begin{cases} 5 \text{ мА} & \text{для датчиков с верхним пределом 5 мА} \\ 20 \text{ мА} & \text{для датчиков с верхним пределом 20 мА,} \end{cases}$$

$$I_{\min} = \begin{cases} 0 & \text{для датчиков с нижним пределом 0 мА} \\ 4 \text{ мА} & \text{для датчиков с нижним пределом 4 мА.} \end{cases}$$

- Для специальных типов датчиков с выходом напряжения сигнал в относительных единицах вычисляется прямо по напряжению

$$I_0 = U_{\text{дат}}/U_{\text{max}}, \quad (1.4)$$

где U_{max} задается при описании датчика.

- Для датчиков температуры, фактически измеряющих сопротивление цепи, величина сопротивления рассчитывается по формуле, Ом

$$R_t = U_{\text{дат}}/I_{05}, \quad (1.5)$$

где I_{05} - постоянный ток через датчик, мА (заводская константа, близкая к 0.5 мА).

1.1.2 Частотные датчики

Программа обработки частотных датчиков рассчитана на использование только датчиков расхода с частотой следования импульсов, линейно зависящей от мгновенного значения расхода. Датчик может быть подключен к основным частотным входам или к внешним модулям частотных входов; дисциплина их обработки одинакова.

Для всех описанных частотных датчиков с частотой 125 Гц производится интегрирование семибитовых аппаратных счетчиков входных импульсов. Интегрирование продолжается в течение каждой секунды, образуя, таким образом, мгновенные значения частоты F_i . Для повышения точности счета частоты всегда сохраняется 8 ее последних замеров, и один раз за цикл по каждому датчику вычисляется среднее арифметическое значение, являющееся текущей частотой F , Гц, по формуле

$$F = \left(\sum_{i=1}^8 F_i \right) / 8 \quad (1.6)$$

Рассчитанная величина частоты помещается в массив $U_{\text{дат}}(j)$, используется для расчета расхода по формуле (1.12) и индексируется как параметр «сигнал датчика». Максимальное значение частоты – до 5 кГц. Вычисление частоты производится только в режиме РАБОТА.

1.1.4 Числоимпульсные датчики

Под числоимпульсными понимаются датчики расхода интегрирующего типа с частотой следования импульсов до 5 кГц, подключенные к основным частотным входам или к внешним модулям частотных входов; дисциплина их обработки одинакова. Каждый импульс отмечает прохождение через датчик определенного количества вещества измеряемой среды.

Для всех описанных числоимпульсных датчиков с частотой 125 Гц производится интегрирование семибитовых аппаратных счетчиков входных импульсов. В режиме РАБОТА один раз за основной цикл накопленное значение преобразуется в число с плавающей точкой $N_{\text{имп}}(j)$, служащее для определения полученной за данный цикл величины расхода dG_k (см. формулу (1.14)), после чего очищается.

Частота входных импульсов определяется на отдельных счетчиках аналогично частотным датчикам по формуле (1.6). Вычисленное значение частоты помещается в массив $U_{\text{дат}}(j)$ только как вспомогательная величина для индикации в качестве параметра «сигнал датчика»; в дальнейших расчетах не участвует.

Для исключения влияния «дребезга» контактов сигналы датчиков могут подвергаться цифровой фильтрации путем аппаратного (на частоте 250 Гц) и программного (на частоте 10 Гц) прореживания.

1.1.5 Режимы поверки

1.1.5.1 Для метрологических целей в программе ТЭКОН предусмотрены два специальных режима:

- Аттестация алгоритмов.
- Периодическая поверка.

Эти режимы могут назначаться как отдельно, так и одновременно.

1.1.5.2 В режиме аттестации алгоритмов программно блокирована запись реальных входных сигналов с аналоговых и частотных датчиков в массив *U_{дат}*. Ввод сигналов числоимпульсных датчиков сохраняется. Для всех датчиков параметр «сигнал датчика» свободно доступен на запись и позволяет пользователю занести любые желаемые значения, которые позволят оценить точность работы последующих алгоритмов преобразования и расчета информации в программе ТЭКОН. Для всех типов датчиков блокирован контроль по выходу за максимум, минимум и обрыву датчика, описанный далее в 1.2.1.2, 1.2.1.3.

Введенное с клавиатуры лицевой панели ТЭКОН значение напряжения в милливольтках для аналоговых датчиков и частоты в герцах для частотных датчиков сохраняется неограниченно долго.

Параметр «сигнал датчика» для числоимпульсных датчиков в режиме аттестации индицирует количество импульсов за текущий цикл программы, а не частоту, как в обычном режиме. Ввод с клавиатуры для этих датчиков возможен лишь в те циклы программы, на которых нет входных импульсов. Введенное с клавиатуры значение, представляющее собой имитацию количества импульсов на текущем цикле, сохраняется лишь в течение одного цикла, после чего стирается.

1.1.5.3 В режиме периодической поверки для числоимпульсных датчиков игнорируются их параметры настройки *Константа 1* и *Константа 2*. Вес импульса принимается равным 1.0, и датчик фактически накапливает количество входных импульсов за соответствующий период. Частотные и аналоговые датчики работают в обычном режиме.

1.2 Определение физических величин

1.2.1 Общие принципы

1.2.1.1 В режиме РАБОТА на каждом цикле основной программы (с периодом от 2 до 30с, в зависимости от числа и типа описанных датчиков, трубопроводов и регуляторов), ТЭКОН выполняет однократное вычисление мгновенных значений физических величин по показаниям всех описанных датчиков. Эти параметры индицируются как «измеренные значения датчиков». Для числоимпульсных датчиков получаются сразу не мгновенные, а некие накапливаемые параметры (расход за цикл).

1.2.1.2 После вычисления мгновенные значения проверяются на допуск, для чего сравниваются с заданными максимальным и минимальным значениями, и в случае выхода за них вместо физической величины подставляются соответствующие константы замены с выдачей сигнала отказа. После входа в допуск текущий отказ снимается. Для числоимпульсных датчиков расхода выход за максимум определяется по накопленной с начала часа сумме, после чего до конца часа счет импульсов прекращается. Выход за минимум для этих датчиков определяется однократно в конце часа по накопленной сумме.

1.2.1.3 Если программа самоконтроля обнаружила обрыв какого-либо датчика, в качестве измеренной физической величины подставляется константа замены при обрыве или среднее значение за предыдущие сутки (трое суток) в зависимости от описания датчика. Контроль обрыва выполняется на каждом цикле работы по следующим условиям:

- для любых аналоговых датчиков сигнал должен быть неотрицательным;
- для аналоговых токовых датчиков с пределом 4-20 мА ток должен быть больше 3.9 мА;
- для термометров сопротивления должно выполняться условие

$$\left. \begin{array}{l} 0.5R_0 < R_t < 2R_0 \text{ для типа ТСМ,} \\ 0.5R_0 < R_t < 4R_0 \text{ для типа ТСР,} \end{array} \right\} \quad (1.8)$$

где R_t – текущее вычисленное значение сопротивления,
 R_0 – заданное значение сопротивления при 0 градусов;

- напряжение термопары не должно превышать
 - 128мВ для типа ХК,
 - 64мВ для типа ХА,
 - 16мВ для типа ПП;
- для частотных датчиков, у которых минимальная частота F_{min} не равна нулю, текущая частота должна быть больше $0.5 \cdot F_{min}$;

Для числоимпульсных датчиков обрывом считается полное отсутствие импульсов в течение календарного часа. На время перезапуска ТЭКОН для всех типов датчиков, независимо от их исправности, назначается заменяющий сигнал при обрыве (константа или средний).

1.2.1.4 Кроме мгновенных значений, для датчиков, описанных «с хранением», выполняется накопление суммы замеров и вычисляются средние значения за определенные промежутки времени:

- за время измерительного интервала с задаваемой длительностью от 1 до 30 минут, далее условно называемого "интервал 5 минут". В часе должно укладываться целое число таких интервалов;
- за календарный час;
- за расчетные сутки, начинающиеся с заданного расчетного часа;
- за расчетный месяц, начинающийся с заданного расчетного числа.

Для накапливающих датчиков (расход) имеет смысл индикация и средних значений, и сумм. Для остальных датчиков суммы являются вспомогательными параметрами, служащими только для расчета средних значений. Обновление информации происходит:

- по текущему интервалу измерения на каждом цикле работы основной программы;
- по текущему часу только в момент окончания очередного интервала измерения. Одновременно данные по интервалу измерений сохраняются как параметры предыдущего интервала;
- по текущим суткам только в момент окончания текущего часа. Одновременно переписывается в предыдущий час либо сумма (для датчиков расхода), либо среднее значение (для остальных датчиков);
- по текущему месяцу только в момент окончания расчетных суток. Одновременно переписывается в предыдущие сутки либо сумма (для датчиков расхода), либо среднее значение (для остальных датчиков).

датчиков). Сумма при добавлении к месячному параметру предварительно делится на заданное при описании датчика число «Кпер», что увеличивает единицы измерения во столько же раз для сохранения возможности индикации параметра;

- по окончании расчетного месяца переписывается в предыдущий месяц либо сумма (для датчиков расхода), либо среднее значение (для остальных датчиков).

1.2.2 Перепад давления

Расчет мгновенного перепада давления dP' выполняется в тех единицах, в которых описан датчик, кгс/м² или кПа, по формуле

$$dP' = dP_{\text{ном}} * I_0 \quad (1.9)$$

где $dP_{\text{ном}}$ - первая константа датчика, выраженная в кгс/м² или кПа,
 I_0 - ток датчика в относительных единицах.

Все дальнейшие параметры по датчику, от среднего за интервал до среднего за месяц, вычисляются, индексируются и хранятся также в исходных единицах измерения. Поскольку расчеты в трубопроводах всегда выполняются в килопаскалях, согласование единиц измерения производится только в использующем данный сигнал трубопроводе.

1.2.3 Давление

В зависимости от описания датчик может измерять как избыточное, так и абсолютное давление, как в кгс/см², так и в МПа:

$$P_d = I_0 * P_{\text{ном}} + P_{\text{поп}}, \quad (1.10)$$

где $P_{\text{ном}}$ - шкала датчика давления (первая константа),
 $P_{\text{поп}}$ - поправка на разность высот установки трубопровода и датчика (вторая константа).

Поправка должна отличаться от нуля только в случае измерения давления жидкостей, при импульсных трубках, заполненных жидкостью.

Датчик атмосферного давления должен быть описан либо как «датчик абсолютного давления в кгс/см²», либо как «датчик вида прочие с линейной шкалой». В любом случае его константы должны задаваться в миллиметрах ртутного столба; и показания датчика будут в этих же единицах.

Все дальнейшие параметры по датчику, от среднего за интервал до среднего за месяц, вычисляются, индексируются и хранятся также в исходных единицах измерения. Поскольку расчеты в трубопроводах всегда выполняются в мегапаскалях, согласование единиц измерения, определение абсолютного и избыточного давлений производится только в использующем данный сигнал трубопроводе.

1.2.4 Расход

1.2.4.1 Для датчиков расхода с аналоговым выходом (не интегрирующих) мгновенный расход, ед/час, определяется по формуле

$$G_{\text{кд}} = G_{\text{ном}} * I_0, \quad (1.11)$$

где $G_{\text{ном}}$ - первая константа датчика в ед/час. Единицы могут быть тоннами или кубометрами в зависимости от паспортных данных датчика.

1.2.4.2 Для датчиков расхода с частотным выходом (не интегрирующих) мгновенный расход, ед/час, определяется по формуле

$$G_{\text{кд}} = G_{\text{mn}} + K_d * (F - F_{\text{mn}}), \quad (\text{ед/час}) \quad (1.12)$$

где F - текущая частота, Гц;
 G_{mn} - минимальный измеряемый расход (первая константа датчика), ед/час;
 K_d - крутизна характеристики датчика (вторая константа), ед/час/Гц;
 F_{mn} - частота, соответствующая G_{mn} (третья константа), Гц.

Крутизна K_d , ед/час/Гц, предварительно вычисляется пользователем по формуле

$$K_d = (G_{mx} - G_{mn}) / (F_{mx} - F_{mn}), \quad (1.13)$$

где G_{mx} - максимальный измеряемый расход, ед/час
 F_{mx} - частота, соответствующая G_{mx} , Гц.

1.2.4.3 Числоимпульсный датчик дает сразу расход за цикл расчета (как правило, в единицах объема, например, м³)

$$dG_{ko}' = G_{ном} * N_{имп} * K_{попр} / 1000, \quad (1.14)$$

где $G_{ном}$ - «вес» импульса (первая константа датчика), м³;
 $N_{имп}$ - число импульсов за время цикла, полученное программой ввода;
 $K_{попр}$ - увеличенный в 1000 раз поправочный коэффициент на неточность установки (2-я константа датчика).

Для определения мгновенного расхода G_k , ед/час, который является лишь справочным параметром, выполняется обратный пересчет:

$$G_k = dG_{ko}' / dt_{ц}. \quad (1.15)$$

При малой частоте входных импульсов параметр G_k дает лишь грубое приближение и сильно колеблется. Более точными являются средние значения расхода за измерительный интервал и за час.

1.2.4.4 Все измеренные датчиками значения показывают расход в рабочих условиях, без учета термодинамических характеристик среды. Пересчет к нормальным условиям или коррекция, а также согласование единиц измерения датчика и использующего его трубопровода выполняются только в самом трубопроводе. Мгновенные и средние значения для датчиков расхода являются мощностными параметрами, приведенными к часу, а все суммы - это интегральные показатели за соответствующий период.

1.2.5 Измерение температуры терморезистором

1.2.5.1 ТЭКОН позволяет применять в качестве датчиков температуры терморезисторы с линейной зависимостью сопротивления от температуры (например, медные типа ТСМ), Ом, по формуле

$$R_t = R_0 * (1 + a_1 * t), \quad (1.16)$$

и с квадратичной зависимостью (например, платиновые типа ТСП)

$$R_t = R_0 * (1 + a_1 * t + a_2 * t^2), \quad (1.17)$$

где R_0 - сопротивление датчика при 0 градусов С, Ом;
 R_t - сопротивление датчика при текущей температуре t , Ом;
 a_1 - температурный коэффициент при первой степени температуры, 1/град;
 a_2 - температурный коэффициент при второй степени температуры, 1/град².

Величины R_0 , a_1 , a_2 задаются через константы настройки данного датчика. Величина R_t рассчитывается по (1.5).

1.2.5.3 Температура в градусах Цельсия для терморезистора с линейной зависимостью сопротивления от температуры:

$$T_d = \frac{R_t - R_0}{R_0 * a_1}. \quad (1.18)$$

Первой константой датчика является значение R_0 , а второй - увеличенное в 10⁵ раз значение a_1 (температурный коэффициент сопротивления ТКС). Согласно [12], для термометров типа «ТСМ с $W_i=1.428$ » стандартное значение второй константы 427.8, для термометров типа «ТСМ с $W_i=1.426$ » стандартное значение второй константы 426.0. Для термометров типа «ТСМ с $W_i=1.426$ » формула (1.18) справедлива во всем их рабочем диапазоне от минус 50 до 200 градусов. Для «ТСМ с $W_i=1.428$ » формула

(1.18) справедлива в диапазоне от минус 10 до 200 градусов, а при температурах ниже минус 10 градусов (до минус 100 градусов) зависимость сопротивления, Ом, от температуры становится квадратичной

$$R_t = R_0 * (1 + a_1 * t + a_2 * t(t - 10)) \quad (1.19)$$

В этом случае значение температуры в градусах Цельсия уточняется по формуле

$$T_d = \frac{(10 * a_2 - a_1) + \sqrt{(10 * a_2 - a_1)^2 + 4 * a_2 * (R_t - R_0) / R_0}}{2 * a_2} \quad (1.20)$$

Величина a_2 задается через 3-ю константу датчика в увеличенном в 10^{10} раз виде. Для термометров типа «ТСМ с $W_i=1.428$ » стандартное значение константы равно минус 5413.6, для термометров типа «ТСМ с $W_i=1.426$ » стандартное значение константы равно 0.

1.2.5.4 Температура в градусах Цельсия для терморезистора с квадратичной зависимостью сопротивления от температуры:

$$T_d = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4 * a_2 * (R_t - R_0) / R_0}}{2 * a_2} \quad (1.21)$$

Константы датчика:

- первая - значение R_0 ;
- вторая - увеличенное в 10^5 раз значение a_1 ;
- третья - увеличенное в 10^{10} раз значение a_2 .

Согласно [12], для термометров типа «ТСП с $W_i=1.391$ » стандартное значение второй константы равно 396.92, третьей константы минус 5829.0. Для термометров типа «ТСП с $W_i=1.385$ » стандартное значение второй константы равно 390.83, третьей константы минус 5775.0. Формула справедлива в диапазоне до 600 градусов.

1.2.6 Измерение температуры термопарой

1.2.6.1 ТЭКОН позволяет измерять температуру (только положительную) с помощью трех типов термопар:

- платина - платинородий ПП-S,
- хромель - копель ХК-L,
- хромель - алюмель ХА.

Для всех термопар измерение температуры холодного спая $T_{ХС}$, градусов Цельсия, либо выполняется термометром сопротивления, либо эта величина задается как константа.

1.2.6.2 Определение напряжения холодного спая термопары $U_{ХС}$ в милливольты производится по градуировочной таблице термопары данного типа линейной интерполяцией между узлами, заданными с шагом 10 градусов.

1.2.6.3 Реальное напряжение в сотых долях милливольты с рабочей термопары вычисляется по формуле

$$U_{ртп} = (U_{дат} + U_{ХС}) * 100, \quad (1.22)$$

где $U_{дат}$ - сигнал с датчика (т.е. измеренное с термопары значение), мВ.

1.2.6.4 Расчет температуры выполняется по методу кусочно-линейной аппроксимации. Градуировочные таблицы термопар с равномерным шагом 10 градусов во всем допусаемом для каждого типа термопары диапазоне занесены в программу ТЭКОН в виде таблиц $U(t)$, где напряжение U выражено в сотых долях милливольты, а температура t – в градусах Цельсия. Значения взяты из [13] с округлением исходных значений до 0.01 мВ.

Таблица 1.1 - Градуировочные таблицы термопар, мВ*100

τ	ХК	ХА	ПП	τ	ХК	ХА	ПП	τ	ХК	ХА	ПП
0	0	0	0	500	4030	2064	423	1000	-	4128	958
10	64	40	6	510	4118	2107	433	1010	-	4167	970
20	129	80	11	520	4206	2150	443	1020	-	4205	982
30	195	120	17	530	4295	2192	453	1030	-	4244	994
40	262	161	24	540	4383	2235	463	1040	-	4283	1005
50	331	202	30	550	4471	2278	473	1050	-	4321	1017
60	400	244	36	560	4559	2320	483	1060	-	4360	1029
70	470	285	43	570	4647	2362	493	1070	-	4398	1040
80	541	327	50	580	4735	2406	504	1080	-	4436	1052
90	613	368	57	590	4823	2448	514	1090	-	4474	1064
100	686	410	65	600	4911	2491	524	1100	-	4512	1076
110	760	451	72	610	4999	2533	534	1110	-	4550	1088
120	834	492	80	620	5086	2576	544	1120	-	4587	1099
130	910	533	87	630	5174	2618	555	1130	-	4625	1111
140	986	574	95	640	5262	2660	565	1140	-	4662	1123
150	1062	614	103	650	5349	2703	575	1150	-	4699	1135
160	1140	654	111	660	5437	2745	586	1160	-	4737	1147
170	1218	694	119	670	5524	2787	596	1170	-	4774	1159
180	1297	734	127	680	5611	2829	607	1180	-	4811	1171
190	1376	774	136	690	5699	2871	617	1190	-	4847	1183
200	1456	814	144	700	5786	2913	628	1200	-	4884	1195
210	1537	854	153	710	5873	2955	638	1210	-	4920	1207
220	1618	894	161	720	5960	2997	649	1220	-	4957	1219
230	1699	934	170	730	6047	3038	659	1230	-	4993	1231
240	1782	975	178	740	6133	3080	670	1240	-	5029	1243
250	1864	1015	187	750	6220	3121	681	1250	-	5064	1255
260	1947	1056	196	760	6306	3163	691	1260	-	5100	1268
270	2031	1097	205	770	6392	3204	702	1270	-	5136	1280
280	2115	1138	214	780	6477	3245	713	1280	-	5171	1292
290	2199	1179	223	790	6562	3287	724	1290	-	5206	1304
300	2284	1221	232	800	6647	3328	735	1300	-	5241	1316
310	2369	1262	241	810	-	3369	745	1310	-	-	1328
320	2455	1304	251	820	-	3409	756	1320	-	-	1340
330	2541	1346	260	830	-	3450	767	1330	-	-	1352
340	2627	1387	269	840	-	3491	778	1340	-	-	1364
350	2713	1429	279	850	-	3531	789	1350	-	-	1377
360	2800	1471	288	860	-	3572	800	1360	-	-	1389
370	2887	1513	297	870	-	3612	811	1370	-	-	1401
380	2974	1555	307	880	-	3652	823	1380	-	-	1413
390	3062	1597	316	890	-	3693	834	1390	-	-	1425
400	3149	1640	326	900	-	3733	845	1400	-	-	1437
410	3237	1682	336	910	-	3773	856	1410	-	-	1449
420	3325	1724	345	920	-	3812	867	1420	-	-	1462
430	3413	1767	355	930	-	3852	879	1430	-	-	1474
440	3500	1809	365	940	-	3892	890	1440	-	-	1486
450	3589	1852	374	950	-	3931	901	1450	-	-	1498
460	3677	1894	384	960	-	3971	913	1460	-	-	1510
470	3765	1937	394	970	-	4010	924	1470	-	-	-
480	3853	1979	404	980	-	4049	936	1480	-	-	-
490	3942	2022	413	990	-	4089	947	1490	-	-	-

Формула для расчета температуры в градусах Цельсия

$$T_d = T_l + \frac{U_{РТП} - U_{П}}{U_{ПР} - U_{П}} * dT, \quad (1.23)$$

где

$U_{П}$ - табличное значение напряжения на левой границе интервала интерполяции, мВ*100;

$U_{ПР}$ - табличное значение напряжения на правой границе интервала интерполяции, мВ*100;

T_l - температура на левом конце интервала интерполяции, градусов Цельсия;

$dT=10$ постоянная длина интервала, градусов.

Для интерполяции выбирается интервал с номером n , в котором выполняется условие

$$U_l \leq U_{РТП} < U_{ПР}, \quad (1.24)$$

причем

$$T_l = n * dT, \quad 0 \leq n < N_{МАХ}, \quad (1.25)$$

где N_{MAX} - число точек в таблице данного типа термопары.

1.2.7 Прочие датчики с линейной шкалой

Расчетное значение любого параметра, измеряемого датчиком общего вида с линейной шкалой, определяется по формуле:

$$Y = (Y_{\text{вш}} - Y_{\text{нш}}) * I_0 + Y_{\text{нш}}, \quad (1.26)$$

где $Y_{\text{вш}}$ - верхний предел шкалы датчика (первая константа)
 $Y_{\text{нш}}$ - нижний предел шкалы датчика (вторая константа).

Единицы измерения констант и расчетного значения зависят от типа датчика. Такими датчиками могут являться, например, датчик калорийности (удельной теплоты сгорания газа) Q_n в МДж/м³ или ккал/м³, датчик плотности природного газа в нормальных условиях ρ_c в кг/м³, а также датчики температуры в градусах Цельсия с нормирующим преобразователем.

1.2.8 Вводимые датчики

Программа ТЭКОН позволяет описать так называемые «условные вводимые датчики». Они не имеют собственных входных преобразователей, а значение физической величины, вырабатываемое таким датчиком, просто вводится в ТЭКОН по каналу последовательного обмена. Такие датчики могут применяться в тех случаях, когда какая-либо величина не измеряется непосредственно, а вводится извне и довольно часто (например, ежедневно) корректируется. К ним относятся атмосферное давление, плотность, калорийность и состав природного газа.

1.2.9 Расход электроэнергии

Для измерения расхода электроэнергии в ТЭКОН-17 используются только числоимпульсные датчики. Если датчик описан как имеющий «вес» импульса, то количество электроэнергии за цикл счета $dG_{\text{ко}}'$, квт*ч, определяется по приведенной ранее общей для числоимпульсных датчиков формуле (1.14), в которой «вес» импульса $G_{\text{ном}}$ задан в квт*ч, а поправочный коэффициент $K_{\text{попр}}$ должен быть равен 1000.

Если числоимпульсный датчик описан как датчик расхода с константой, определяющей не «вес» одного импульса, а число импульсов, приходящееся на единицу измеряемого параметра (в данном случае на 1 квт*ч), то количество электроэнергии за цикл счета $dG_{\text{ко}}'$, квт*ч, определяется по формуле:

$$dG_{\text{ко}}' = N_{\text{имп}}/K_{\text{ном}}, \quad (1.27)$$

где $K_{\text{ном}}$ - число импульсов, приходящееся на 1 квт*ч (первая константа датчика);
 $N_{\text{имп}}$ - число импульсов за время цикла, полученное программой ввода.

Текущая электрическая мощность всегда вычисляется по общей формуле (1.15).

1.3 Согласование трубопроводов и датчиков

1.3.1 Использование датчика перепада

1.3.1.1 Если в данном трубопроводе на сужающем устройстве (СУ) имеется датчик поддиапазона перепада, его сигнал используется в расчетах до тех пор, пока датчик исправен и не переполнился по току (сигнал не достиг максимума), иначе производится переход на сигнал основного датчика:

$$dP_{\text{Исп}} = \begin{cases} dP_0 & \text{если } I_{0 \text{ подд}} \geq 0.99, \text{ или имеется только основной датчик,} \\ & \text{или датчик поддиапазона оборван} \\ dP_{\text{Подд}} & \text{если } I_{0 \text{ подд}} < 0.99 \text{ и датчик исправен.} \end{cases} \quad (1.28)$$

1.3.1.2 Все расчеты в трубопроводе ведутся для перепада давления dP , выраженного в килопаскалях. Согласование единиц измерения перепада в датчике и трубопроводе производится по формуле

$$dP = \begin{cases} dP_{\text{Исп}} & \text{датчик } dP_{\text{Исп}} \text{ проградуирован в кПа} \\ dP_{\text{Исп}} * 0.00980665 & \text{датчик } dP_{\text{Исп}} \text{ проградуирован в кгс/м}^2. \end{cases} \quad (1.29)$$

1.3.2 Вычисление абсолютного и избыточного давления

1.3.2.1 Давление в трубопроводе всегда имеет размерность в мегапаскалях. Всегда вычисляются и абсолютное давление P_a , МПа, и избыточное давление P , МПа, по следующим формулам:

а) если датчик P_d измеряет избыточное давление

$$P = P_d * K \quad (1.30)$$

$$P_a = P + P_{\text{atp}}, \quad (1.31)$$

б) если датчик P_d измеряет абсолютное давление

$$P_a = P_d * K \quad (1.32)$$

$$P = P_a - P_{\text{atp}}, \quad (1.33)$$

где

$$K = \begin{cases} 1 & \text{датчик } P_d \text{ проградуирован в МПа} \\ 0.0980665 & \text{датчик } P_d \text{ проградуирован в кгс/см}^2. \end{cases} \quad (1.34)$$

$$P_{\text{atp}} = 0.00136 * 0.0980665 * P_{\text{atm}} \quad (1.35)$$

P_{atm} - атмосферное давление, заданное в виде константы настройки или замеренное специальным датчиком, миллиметров ртутного столба.

Если давление в трубопроводе задано константой, она описывает **избыточное давление в мегапаскалях**. Константа атмосферного давления **всегда** выражена в миллиметрах ртутного столба.

1.3.2.2 Для трубопровода учета расхода насыщенного пара, в зависимости от настройки, взамен измерения давления возможно вычисление абсолютного давления P_a в функции температуры T_c по стандартной кривой насыщения. Вычисление проводится методом кусочно-линейной аппроксимации по таблице 1.2 с шагом в 1 градус в диапазоне температур от 100 до 279 градусов Цельсия. Данные для таблицы взяты из [11], значения давления в ней выражены в килограммах на квадратный сантиметр и увеличены в 1000 раз. После расчета по таблице давление приводится к мегапаскалям умножением на коэффициент 0.0980665.

Таблица 1.2 - Абсолютное давление насыщенного пара в функции температуры

t	Pa	t	Pa	t	Pa	t	Pa	T	Pa
100	1033	140	3685	180	10225	220	23659	260	47870
101	1070	141	3790	181	10462	221	24115	261	48650
102	1109	142	3898	182	10703	222	24577	262	49440
103	1149	143	4009	183	10950	223	25047	263	50240
104	1190	144	4121	184	11201	224	25523	264	51050
105	1232	145	4237	185	11456	225	26007	265	51870
106	1275	146	4355	186	11715	226	26497	266	52710
107	1319	147	4476	187	11979	227	26995	267	53550
108	1365	148	4599	188	12248	228	27499	268	54400
109	1412	149	4725	189	12522	229	28011	269	55260
110	1460	150	4854	190	12800	230	28531	270	56140
111	1510	151	4985	191	13083	231	29057	271	57020
112	1562	152	5119	192	13371	232	29591	272	57910
113	1614	153	5257	193	13664	233	30133	273	58820
114	1668	154	5397	194	13962	234	30682	274	59730
115	1724	155	5540	195	14265	235	31239	275	60660
116	1781	156	5686	196	14573	236	31803	276	61600
117	1839	157	5836	197	14886	237	32376	277	62550
118	1899	158	5988	198	15204	238	32955	278	63510
119	1961	159	6144	199	15528	239	33544	279	64480
120	2024	160	6302	200	15857	240	34140	-	-
121	2089	161	6464	201	16192	241	34745	-	-
122	2156	162	6630	202	16532	242	35357	-	-
123	2224	163	6798	203	16877	243	35978	-	-
124	2295	164	6970	204	17228	244	36607	-	-
125	2366	165	7146	205	17585	245	37244	-	-
126	2440	166	7325	206	17948	246	37890	-	-
127	2516	167	7507	207	18316	247	38545	-	-
128	2593	168	7693	208	18690	248	39208	-	-
129	2673	169	7883	209	19070	249	39880	-	-
130	2754	170	8076	210	19456	250	40560	-	-
131	2838	171	8274	211	19848	251	41250	-	-
132	2923	172	8475	212	20246	252	41950	-	-
133	3011	173	8679	213	20651	253	42660	-	-
134	3101	174	8888	214	21061	254	43370	-	-
135	3192	175	9101	215	21477	255	44100	-	-
136	3286	176	9317	216	21901	256	44830	-	-
137	3382	177	9538	217	22331	257	45580	-	-
138	3481	178	9763	218	22767	258	46330	-	-
139	3582	179	9992	219	23209	259	47090	-	-

1.3.3 Температура

1.3.3.1 Температура T_c , градусов Цельсия, в точке замера расхода/перепада используется для расчета термодинамических характеристик среды и коррекции показаний расходомера. Температура $T_{вх}$ в точке раздела принадлежности трубопроводов и температура холодного источника $T_{хи}$ служат для расчета отпущенного или полученного количества тепловой энергии.

1.3.3.2 Если измеряемой средой является насыщенный пар, то, в зависимости от настройки, его температура может не измеряться, а рассчитываться как температура насыщения в функции абсолютного давления по формуле

$$T_c = \frac{1000}{A_0 + A_1 \cdot \ln(Pa) + \dots + A_5 \cdot (\ln(Pa))^5} - 273.15, \quad (1.36)$$

где

$$A_0 = 2.20732$$

$$A_1 = -0.2117187$$

$$A_2 = -0.002166605$$

$$A_3 = 1.619692 \cdot 10^{-4}$$

$$A_4 = 4.8998 \cdot 10^{-5}$$

$$A_5 = 3.6917255 \cdot 10^{-6}.$$

1.3.3.3 Абсолютная температура, градусов Кельвина, всегда рассчитывается по формуле

$$T_a = T_c + 273.15. \quad (1.37)$$

2 ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСХОДОМЕРНОГО УЗЛА

2.1 Относительный диаметр СУ

2.1.1 Диаметр трубопровода D , мм, и сужающего устройства d , мм, при рабочей температуре [3]

$$D = D_{20} * (1 + K_T * 10^{-6} * (T_c - 20)), \quad (2.1)$$

$$d = d_{20} * (1 + K_{СУ} * 10^{-6} * (T_c - 20)), \quad (2.2)$$

где D_{20} – диаметр трубопровода при 20 градусах, мм

d_{20} – диаметр СУ при 20 градусах, мм

K_T – температурный коэффициент расширения материала трубопровода, 1/град

$K_{СУ}$ – температурный коэффициент расширения материала СУ, 1/град.

Значения коэффициентов линейного расширения материала трубопровода K_T и материала сужающего устройства $K_{СУ}$, увеличенные в 10^6 раз, определяются согласно Приложению В к [3] путем аппроксимации по формуле:

$$K = A_e + 10^{-3} B_e * T_c + 10^{-6} C_e * T_c^2, \quad (2.3)$$

При настройке трубопровода в ТЭКОН-17 [14] задаются условные коды материалов трубопровода и СУ согласно таблице 2.1.

2.1.2 Относительный диаметр β при рабочей температуре [3]

$$\beta = d/D. \quad (2.4)$$

Таблица 2.1

Материал		A_e	B_e	C_e	Материал		A_e	B_e	C_e
код	марка стали				код	марка стали			
-1	8	10.9	7.7	-2.4	-29	12X18H9ТЛ	16.466	5.36	3.0
-2	10	10.8	9.0	-4.2	-30	15К, 20К	10.8	10.0	0
-3	15	11.1	7.9	-3.9	-31	16ГС	9.903	20.561	-15.675
-4	15М	10.7	13.0	-13.0	-32	О9Г2С	10.68	12.0	0
-5	16М	11.1	8.4	-3.7	-33	40, 45	10.821	17.872	-10.986
-6	20	11.1	7.7	-3.4	-34	10Г2	9.94	22.667	0
-7	20М	10.7	13.0	-13.0	-35	35Х	10.179	19.602	-13.338
-8	25	12.2	0.0	0	-36	38ХА	12.345	5.433	5.36
-9	30	10.2	10.4	-5.6	-37	40Х	10.819	15.487	-9.28
-10	35	10.2	10.4	-5.6	-38	15ХМ	11.448	12.638	-7.137
-11	X6CM	10.1	2.7	0	-39	30ХМ, 30ХМА	10.720	14.667	0
-12	X7CM	10.1	2.7	0	-40	25Х1МФ	10.235	18.64	-13.0
-13	12МХ	11.3	3.8	0	-41	25Х2М1Ф	12.02	8	0
-14	12Х1МФ	10.0	9.6	-6.0	-42	18Х2Н4МА	11.065	11.224	-5.381
-15	12Х17	9.4	7.4	-6.0	-43	38ХН3МФА	11.446	9.574	-4.945
-16	12Х18Н9Т	15.6	8.3	-6.5	-44	О8Х13	9.971	9.095	-4.115
-17	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т	16.206	6.571	0	-45	12Х13	9.557	11.067	-5.0
-18	14Х17Н2	9.4	7.5	-7.8	-46	20Х13	9.52	11.333	0
-19	15ХМА	11.1	8.5	-5.2	-47	30Х13	9.642	9.6	-4.472
-20	15Х1М1Ф	10.4	8.1	-4.4	-48	10Х14Г14НТ	15.22	13.0	0
-21	15Х5М	10.1	2.7	0	-49	О8Х18Н10	15.325	11.25	0
-22	15Х12ЕНФ	9.8	3.0	0	-50	О8Х18Н10Т	15.47	10.5	0
-23	17Х18Н9	15.7	5.7	0	-51	37Х12Н8Г8МФБ	15.8	0	0
-24	20Х23Н13	15.5	1.7	0	-52	31Х19Н9МВБТ	16.216	6.4	0
-25	36Х18Н25С2	12.0	10.0	-5.4	-53	О6ХН28МТ	9.153	30.944	-26.478
-26	35Л	10.26	14.0	0	-54	20Л	11.66	9.0	0
-27	45Л	11.6	0	0	-55	25Л	10.75	12.5	0
-28	20ХМЛ	9.83	18.812	-14.191	Прочие коды (отрицательные)		0	0	0

2.2 Коэффициент истечения

Коэффициент истечения C_v для диафрагм определяется по формуле:

$$C_v = 0.5961 + 0.0261 \cdot \beta^2 - 0.216 \cdot \beta^8 + 0.000521 \cdot (10^6 \cdot \beta / Re)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063 \cdot A) \cdot \beta^{3.5} \cdot (10^6 / Re)^{0.3} + (0.043 + 0.08 \cdot e^{-10L_1} - 0.123 \cdot e^{-7L_1}) \cdot (1 - 0.11 \cdot A) \cdot \beta^4 / (1 - \beta^4) - 0.031 \cdot (M_1 - 0.8 \cdot M_1^{1.1}) \cdot \beta^{1.3} + M_2, \quad (2.5)$$

где

$$A = (19000 \cdot \beta / Re)^{0.8} \quad (2.6)$$

$$M_1 = 2 \cdot L_2 / (1 - \beta) \quad (2.7)$$

$$M_2 = \begin{cases} 0.01 \cdot (0.75 - \beta) \cdot (2.8 - D/25.4) & \text{при } D < 71.12 \text{ мм} \\ 0 & \text{при } D \geq 71.12 \text{ мм} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\left. \begin{aligned} L_1 = L_2 = 0 & \quad \text{угловой способ отбора} \\ L_1 = L_2 = 25.4/D & \quad \text{фланцевый способ отбора} \\ L_1 = 1, \quad L_2 = 0.47. & \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

2.3 Коэффициент скорости входа

Коэффициент скорости входа E_d для всех сред [3]

$$E_d = 1 / (1 - \beta^4)^{1/2} \quad (2.10)$$

2.4 Коэффициент притупления

Согласно формулам, приведенным в [2], если начальный радиус закругления кромки диафрагмы равен 0.04 мм, а межповерочный интервал имеет два фиксированных значения 1 и 2 года, то безразмерный коэффициент притупления K_{Γ} рассчитывается следующим образом

$$K_{\Gamma} = \begin{cases} 0.9826 + (r_k/d + 0.0007773)^{0.6} & \text{при } r_k/d > 0.0004 \\ 1 & \text{при } r_k/d \leq 0.0004 \end{cases} \quad (2.11)$$

где

при межповерочном интервале 1 год:

$$r_k = \begin{cases} 0.062439 & \text{жидкость} \\ 0.063187 & \text{газ} \\ 0.063935 & \text{пар} \end{cases} \quad (2.12)$$

при межповерочном интервале 2 года:

$$r_k = \begin{cases} 0.080519 & \text{жидкость} \\ 0.081869 & \text{газ} \\ 0.08332 & \text{пар} \end{cases} \quad (2.13)$$

2.5 Коэффициент поправки на шероховатость

2.5.1 Предварительные расчеты

$$R_a = R_{\text{ш}} / \pi, \quad (2.14)$$

$$Y = \lg(Re), \quad (2.15)$$

где $R_{\text{ш}}$ – заданная эквивалентная шероховатость, мм;
 $\pi = 3.14159$.

2.5.2 Расчет параметра $R_{a_{\text{max}}}$

$$R_{a_{\text{max}}} = X_{\text{max}} \cdot D / 10^4, \quad (2.16)$$

где

$$\left\{ \right.$$

$$X_{\max} = \begin{cases} 0.718866\beta^{-3.887} + 0.364 & \text{при } Re \leq 10^4 \\ A0\beta^{A1} + A2 & \text{при } Re > 10^4 \text{ \& } \beta < 0.65 \\ A0\cdot 0.65^{A1} + A2 & \text{при } Re > 10^4 \text{ \& } \beta \geq 0.65 \end{cases} \quad (2.17)$$

Re – действительное число Рейнольдса, рассчитываемое по формуле (4.6).
A0, A1, A2 рассчитывают по формуле, приведенной в [2]:

$$A_j = \sum_{n=0}^3 B_n \cdot Y^n, \quad (2.18)$$

Коэффициенты B_n сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

Коэффициент	Значение коэффициента для расчета		
	A0	A1	A2
При $Re \leq 10^5$			
B0	8.87	6.7307	-10.244
B1	-3.7114	-5.5844	5.7094
B2	0.41841	0.732485	-0.76477
B3	0	0	0
При $10^5 < Re \leq 3 \cdot 10^6$			
B0	27.23	-25.928	1.7622
B1	-11.458	12.426	-3.8765
B2	1.6117	-2.09397	1.05567
B3	-0.07567	0.106143	-0.076764
При $3 \cdot 10^6 < Re$			
B0	16.5416	322.594	-92.029
B1	-6.60709	-132.2	37.935
B2	0.88147	17.795	-5.1885
B3	-0.039226	-0.799765	0.23583

Рассчитанное по формуле (2.17) значение X_{\max} ограничивается в пределах от 0 до 15.0 и округляется до двух значащих цифр.

2.5.3 Расчет параметра Ra_{\min}

$$Ra_{\min} = X_{\min} \cdot D / 10^4, \quad (2.19)$$

где

$$X_{\min} = \begin{cases} 0 & \text{при } Re \leq 3 \cdot 10^6 \\ 7.1592 - 12.387\beta - (2.0118 - 3.469\beta) \cdot Y + (0.1382 - 0.23762\beta) \cdot Y^2 & \text{при } Re > 3 \cdot 10^6 \text{ \& } \beta < 0.65 \\ -0.892353 + 0.24308 \cdot Y - 0.0162562 \cdot Y^2 & \text{при } Re > 3 \cdot 10^6 \text{ \& } \beta \geq 0.65 \end{cases} \quad (2.20)$$

Вычисленное по формуле (2.20) значение X_{\min} ограничивается снизу на нуле.

3.8.4 Расчет коэффициента поправки на шероховатость выполняется по формулам:

$$\left\{ \begin{aligned} K_{\text{ш}} &= 1 && \text{при } Ra_{\min} \leq Ra \leq Ra_{\max} \\ &= 1 + 5.22\beta^{3.5}(\lambda - \lambda^*) && \text{в противном случае} \end{aligned} \right. \quad (2.21)$$

где λ и λ^* рассчитываются по одинаковой формуле, но с разными значениями коэффициентов:

$$\lambda = \{1.74 - 2 \cdot \lg[2 \cdot A_{\text{ш}}/D - (37.36 \cdot \lg(K_D - K_R \cdot \lg(K_D + 3.3333 \cdot K_R)))/Re]\}^{-2} \quad (2.22)$$

$$A_{\text{ш}} = \begin{cases} R_{\text{ш}} & \text{для } \lambda \\ \pi \cdot Ra_{\max} & \text{для } \lambda^* \text{ при } Ra > Ra_{\max} \\ \pi \cdot Ra_{\min} & \text{для } \lambda^* \text{ при } Ra < Ra_{\min} \end{cases} \quad (2.23)$$

$$K_D = \begin{cases} 0.26594 \cdot R_{\text{ш}}/D & \text{для } \lambda \\ 0.26594 \cdot \pi \cdot Ra_{\max}/D & \text{для } \lambda^* \text{ при } Ra > Ra_{\max} \\ 0.26594 \cdot \pi \cdot Ra_{\min}/D & \text{для } \lambda^* \text{ при } Ra < Ra_{\min} \end{cases} \quad (2.24)$$

$$K_R = 5.035/Re \quad (2.25)$$

3 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ

3.1 Псевдокритические и приведенные параметры

3.1.1 Вода, перегретый и насыщенный пар [9]

Приведенное абсолютное давление π определяется по формуле

$$\pi = P_a / 22.064 . \quad (3.1)$$

Приведенная температура τ определяется по формуле

$$\tau = T_a / 647.14 . \quad (3.2)$$

3.1.2 Природный газ [6]

3.1.2.1 Псевдокритическое давление $P_{ПК}$, МПа, определяется по формуле

$$P_{ПК} = 2.9585 \cdot (1.608 - 0.05994 \cdot \rho_C + X_Y - 0.392 \cdot X_A), \quad (3.3)$$

где ρ_C – плотность газа в нормальных условиях, кг/м³,
 X_Y - молярная концентрация углекислого газа, долей единицы,
 X_A - молярная концентрация азота, долей единицы.

3.1.2.2 Псевдокритическая температура $T_{ПК}$, градусов, определяется по формуле

$$T_{ПК} = 88.25 \cdot (0.9915 + 1.759 \cdot \rho_C - X_Y - 1.681 \cdot X_A). \quad (3.4)$$

3.1.2.3 Приведенные давление π и температура τ

$$\pi = P_a / P_{ПК} \quad (3.5)$$

$$\tau = T_a / T_{ПК} . \quad (3.6)$$

3.2 Динамическая вязкость

Динамическая вязкость μ , Па*с, рассчитывается для любой среды, причем значение увеличено в 10⁶ раз. Для технического газа с вводимыми характеристиками показатель μ в рабочих условиях задается при настройке трубопровода.

3.2.1 Вода

Динамическая вязкость воды определяется аппроксимацией данных таблицы 3 ГСССД 6-89 в функции температуры и давления по формуле:

$$\mu = A_0 + A_1 \cdot T_c + P_a \cdot (A_2 + A_3 \cdot T_c). \quad (3.7)$$

Значения коэффициентов аппроксимации сведены в таблицу 3.1

3.2.2 Пар перегретый и насыщенный

Динамическая вязкость любого вида пара определяется в соответствии с [10] по формуле:

$$\mu = 0.1 \cdot [(-22.391 \cdot \tau^2 + 326.46 \cdot \tau - 78.034 + 6.6119 \cdot \tau^{-2}) + \pi \cdot (65.605 \cdot \tau^{-2} - 74.535 \cdot \tau^{-3}) + \pi^2 \cdot (-19.052 + 124.47 \cdot \tau^{-2} - 97.428 \cdot \tau^{-3}) + \pi^3 \cdot (-1281.1 + 4910.2 \cdot \tau^{-1} - 6293.7 \cdot \tau^{-2} + 2699.2 \cdot \tau^{-3})]. \quad (3.8)$$

Таблица 3.1 – Динамическая вязкость воды

Диапазон температуры, градусов С	Коэффициенты аппроксимации			
	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃
0.1 < Pa ≤ 0.5 МПа				
0 .. 25	1793.25	-36.109	-2.5	0.09
25 .. 50	1234.075	-13.742	-0.75	0.02
50 .. 75	885.225	-6.765	-0.25	0.01
75 .. 100	1676.8125	-17.3195	-2020.225	26.943
100 .. 150	-109.613	0.54475	1180.63	-5.066
150 .. 200	-160.358	0.88305	1685.38	-8.431
0.5 < Pa ≤ 1.0 МПа				
0 .. 25	1793.0	-36.10	-2.0	0.072
25 .. 50	1234.0	-13.74	-0.6	0.016
50 .. 75	885.6	-6.772	-1.0	0.024
75 .. 100	665.7	-3.84	2.0	-0.016
100 .. 150	480.3	-1.986	0.8	-0.004
150 .. 200	480.3	-1.986	0.8	-0.004
1.0 < Pa ≤ 2.5 МПа				
00 .. 25	1793.7	-36.124	-2.667	0.096
25 .. 50	1234.1	-13.743	-0.733	0.0187
50 .. 75	884.8	-6.756	-0.2	0.008
75 .. 100	666.9	-3.851	0.8	-0.0053
100 .. 150	480.8	-1.99	0.267	0
150 .. 200	919.1	-4.912	-236.353	1.5775
2.5 < Pa ≤ 5.0 МПа				
0 .. 25	1793.0	-36.104	-2.4	0.088
25 .. 50	1233.7	-13.732	-0.56	0.0144
50 .. 75	883.1	-6.72	0.48	-0.0064
75 .. 100	670.7	-3.888	-0.72	0.0096
100 .. 150	481.1	-1.992	0.16	0.0008
150 .. 200	327.2	-0.966	0.4	-0.0008

3.2.3 Природный газ

Динамическая вязкость природного газа определяется согласно [6] по формулам

$$\mu_T = 3.24 \cdot \frac{T_a^{0.5} + 1.37 - 9.09 \cdot \rho_c^{0.125}}{\rho_c^{0.5} + 2.08 - 1.5 \cdot (X_A + X_Y)} \quad (3.9)$$

$$\mu = \begin{cases} \mu_T & \text{при } Pa \leq 0.5 \text{ МПа} \\ \mu_T \cdot C_\mu & \text{при } Pa > 0.5 \text{ МПа,} \end{cases} \quad (3.10)$$

где

$$C_\mu = \frac{\pi^2}{30 \cdot (\tau - 1)} \quad (3.11)$$

3.3 Плотность в рабочих условиях

Плотность в рабочих условиях ρ , кг/м³, вычисляется для воды и перегретого пара.

3.3.1 Вода

Плотность воды в рабочих условиях определяется в соответствии с [9] по формуле

$$\begin{aligned} \rho = 10^3 / \{ & 114.332 * \tau - 431.6382 + 706.5474 * \tau^{-1} - 641.9127 * \tau^{-2} + 349.4417 * \tau^{-3} - 113.8191 * \tau^{-4} + \\ & + 20.5199 * \tau^{-5} - 1.578507 * \tau^{-6} + \\ & + \pi * (-3.117072 + 6.589303 * \tau^{-1} - 5.210142 * \tau^{-2} + 1.819096 * \tau^{-3} - 0.2365448 * \tau^{-4}) + \\ & + \pi^2 * (-6.417443 * \tau + 19.84842 - 24.00174 * \tau^{-1} + 14.21655 * \tau^{-2} - 4.13194 * \tau^{-3} + 0.4721637 * \tau^{-4}) \}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.1.3 Пар перегретый

Плотность перегретого пара определяется в соответствии с [10] по формуле

$$\rho = \frac{73.874969 * \pi}{\tau * Z}. \quad (3.13)$$

где Z – коэффициент сжимаемости перегретого пара, вычисляемый по формуле:

$$\begin{aligned} Z = 1 + \pi * (0.4409392 * \tau^{-1} - 1.386598 * \tau^{-2} + 1.380501 * \tau^{-3} - 0.7644377 * \tau^{-4}) + \\ + \pi^2 * (56.40548 * \tau^{-1} - 297.0161 * \tau^{-2} + 617.8258 * \tau^{-3} - 634.747 * \tau^{-4} + 322.8009 * \tau^{-5} - 65.45004 * \tau^{-6}) + \\ + \pi^3 * (149.3651 * \tau^{-1} - 895.0375 * \tau^{-2} + 2123.035 * \tau^{-3} - 2488.625 * \tau^{-4} + 1439.213 * \tau^{-5} - 327.7709 * \tau^{-6}) + \\ + \pi^4 * (151.1386 - 967.3387 * \tau^{-1} + 2478.739 * \tau^{-2} - 3178.106 * \tau^{-3} + 2038.512 * \tau^{-4} - 523.2041 * \tau^{-5}). \end{aligned} \quad (3.14)$$

3.1.4 Пар насыщенный

Плотность сухого насыщенного пара определяется в соответствии с [10] по формуле

$$\rho = 322.0 * \exp(-2.02957 * \xi^{2/6} - 2.68781 * \xi^{4/6} - 5.38107 * \xi^{8/6} - 17.3151 * \xi^{18/6} - 44.6384 * \xi^{37/6} - 64.3486 * \xi^{71/6}),$$

где $\xi = 1 - \tau$.

(3.15)

3.4 Показатель адиабаты

Безразмерный показатель адиабаты κ рассчитывается для любого вида пара и природного газа. Для технического газа с вводимыми характеристиками показатель κ в рабочих условиях задается при настройке трубопровода.

3.4.1 Пар перегретый и насыщенный

Показатель адиабаты для любого вида пара рассчитывается по формуле, разработанной ВНИИЦ СМВ ГСССД Госстандарта России

$$\begin{aligned} \kappa = (1.151215 + 0.197757 * \tau^{-1} - 0.0583239 * \tau^{-2}) + \pi * (0.147714 * \tau^{-3} - 0.164463 * \tau^{-4}) + \\ + \pi^2 * (-39.0946 + 172.750 * \tau^{-1} - 283.683 * \tau^{-2} + 205.208 * \tau^{-3} - 55.2146 * \tau^{-4}) + \\ + \pi^3 * (15.0622 * \tau^{-1} - 53.835 * \tau^{-2} + 63.7138 * \tau^{-3} - 24.9018 * \tau^{-4}). \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.4.2 Природный газ

Показатель адиабаты для природного газа определяется согласно [6] по формуле

$$\kappa = 1.556 \cdot (1 + 0.074 \cdot X_A) - 0.00039 \cdot T_a \cdot (1 - 0.68 \cdot X_A) - 0.208 \cdot \rho_C + \\ + (P_a/T_a)^{1.43} \cdot [384 \cdot (1 - X_A) \cdot (P_a/T_a)^{0.8} + 26.4 \cdot X_A]. \quad (3.17)$$

3.5 Коэффициент расширения

Для воды коэффициент расширения в расчетах не используется, но для общности положим его равным единице. Для пара и газа коэффициент расширения ε определяется согласно [3] по формуле

$$\varepsilon = 1 - (0.351 + 0.256 \cdot \beta^4 + 0.93 \cdot \beta^8) \cdot [1 - (1 - 0.001 \cdot dP/P_a)^{1/\kappa}] \quad (3.18)$$

3.6 Коэффициент сжимаемости

Коэффициент сжимаемости $K_{сж}$ рассчитывается только для природного газа по методу GERG-91 согласно требованиям [7]. Для технического газа с вводимыми характеристиками параметр $K_{сж}$ в рабочих условиях задается при настройке трубопровода.

3.6.1 Определение фактора сжимаемости при стандартных условиях Z_c :

$$Z_c = 1 - (0.0741 \cdot \rho_C - 0.006 - 0.063 \cdot X_A - 0.0575 \cdot X_Y)^2 \quad (3.19)$$

3.6.2 Определение фактора сжимаемости Z производится по формулам:

$$Z = (1 + A_2 + A_1/A_2)/3, \quad (3.20)$$

где

$$A_2 = [A_0 - (A_0^2 - A_1^3)^{0.5}]^{1/3}, \quad (3.21)$$

$$A_0 = 1 + 1.5 \cdot (B_0 + C_0), \quad (3.22)$$

$$A_1 = 1 + B_0, \quad (3.23)$$

$$B_0 = b \cdot V_m, \quad (3.24)$$

$$C_0 = b^2 \cdot C_m, \quad (3.25)$$

$$b = 10^3 \cdot P_a / (2.7715 \cdot T_a), \quad (3.26)$$

где V_m и C_m – коэффициенты уравнения состояния,

$$V_m = X_9^2 \cdot V_1 + X_9 \cdot X_A \cdot V^* \cdot (V_1 + V_2) - 1.73 \cdot X_9 \cdot X_Y \cdot (V_1 \cdot V_3)^{0.5} + X_A^2 \cdot V_2 + \\ + 2 \cdot X_A \cdot X_Y \cdot V_{23} + X_Y^2 \cdot V_3, \quad (3.27)$$

$$C_m = X_9^3 \cdot C_1 + 3 \cdot X_9^2 \cdot X_A \cdot C^* \cdot (C_1^2 \cdot C_2)^{1/3} + 2.76 \cdot X_9^2 \cdot X_Y \cdot (C_1^2 \cdot C_3)^{1/3} + 3 \cdot X_9 \cdot X_A^2 \cdot C^* \cdot (C_1 \cdot C_2^2)^{1/3} + \\ + 6.6 \cdot X_9 \cdot X_A \cdot X_Y \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot C_3)^{1/3} + 2.76 \cdot X_9 \cdot X_Y^2 \cdot (C_1 \cdot C_3^2)^{1/3} + X_A^3 \cdot C_2 + 3 \cdot X_A^2 \cdot X_Y \cdot C_{223} + \\ + 3 \cdot X_A \cdot X_Y^2 \cdot C_{233} + X_Y^3 \cdot C_3, \quad (3.28)$$

где X_9 - молярная доля эквивалентного углеводорода,

$$X_9 = 1 - X_A - X_Y, \quad (3.29)$$

$$V_1 = -0.425468 + 2.865 \cdot 10^{-3} \cdot T_a - 4.62073 \cdot 10^{-6} \cdot T_a^2 +$$

$$+ (8.77118 \cdot 10^{-4} - 5.56281 \cdot 10^{-6} \cdot T_a + 8.8151 \cdot 10^{-9} \cdot T_a^2) \cdot H +$$

$$+ (-8.24747 \cdot 10^{-7} + 4.31436 \cdot 10^{-9} \cdot T_a - 6.08319 \cdot 10^{-12} \cdot T_a^2) \cdot H^2, \quad (3.30)$$

$$B_2 = -0.1446 + 7.4091 \cdot 10^{-4} \cdot T_a - 9.1195 \cdot 10^{-7} \cdot T_a^2, \quad (3.31)$$

$$B_{23} = -0.339693 + 1.61176 \cdot 10^{-3} \cdot T_a - 2.04429 \cdot 10^{-6} \cdot T_a^2, \quad (3.32)$$

$$B_3 = -0.86834 + 4.0376 \cdot 10^{-3} \cdot T_a - 5.1657 \cdot 10^{-6} \cdot T_a^2, \quad (3.33)$$

$$C_1 = -0.302488 + 1.95861 \cdot 10^{-3} \cdot T_a - 3.16302 \cdot 10^{-6} \cdot T_a^2 +$$

$$+ (6.46422 \cdot 10^{-4} - 4.22876 \cdot 10^{-6} \cdot T_a + 6.88157 \cdot 10^{-9} \cdot T_a^2) \cdot H +$$

$$+ (-3.32805 \cdot 10^{-7} + 2.2316 \cdot 10^{-9} \cdot T_a - 3.67713 \cdot 10^{-12} \cdot T_a^2) \cdot H^2, \quad (3.34)$$

$$C_2 = 7.8498 \cdot 10^{-3} - 3.9895 \cdot 10^{-5} \cdot T_a + 6.1187 \cdot 10^{-8} \cdot T_a^2, \quad (3.35)$$

$$C_3 = 2.0513 \cdot 10^{-3} + 3.4888 \cdot 10^{-5} \cdot T_a - 8.3703 \cdot 10^{-8} \cdot T_a^2, \quad (3.36)$$

$$C_{223} = 5.52066 \cdot 10^{-3} - 1.68609 \cdot 10^{-5} \cdot T_a + 1.57169 \cdot 10^{-8} \cdot T_a^2, \quad (3.37)$$

$$C_{233} = 3.58783 \cdot 10^{-3} + 8.06674 \cdot 10^{-6} \cdot T_a - 3.25798 \cdot 10^{-8} \cdot T_a^2, \quad (3.38)$$

$$B^* = 0.72 + 1.875 \cdot 10^{-5} \cdot (320 - T_a)^2, \quad (3.39)$$

$$C^* = 0.92 + 0.0013 \cdot (T_a - 270). \quad (3.40)$$

Величина H рассчитывается по формуле

$$H = 128.64 + 47.479 \cdot M_{\text{Э}}, \quad (3.41)$$

где $M_{\text{Э}}$ – молярная масса эквивалентного углеводорода

$$M_{\text{Э}} = (24.05525 \cdot Z_C \cdot \rho_C - 28.0135 \cdot X_A - 44.01 \cdot X_y) / X_{\text{Э}}. \quad (3.42)$$

3.6.3 Определение коэффициента сжимаемости

$$K_{\text{СЖ}} = Z / Z_C. \quad (3.43)$$

4 РАСЧЕТ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО РАСХОДА

4.1 Применение датчика перепада

4.1.1 Общий порядок расчетов

В соответствии с требованиями [3], расчет действительного расхода выполняется итерационным способом с подбором числа Рейнольдса. Последовательность вычислений следующая:

1. Рассчитываются характеристики трубопровода и СУ и при данной температуре.
2. Выполняются термодинамические расчеты характеристик среды для данной температуры и давления.
3. Принимается начальное приближение числа Рейнольдса Re^* , равное 10^6 .
4. Рассчитываются параметры C_v и K_{sh} для выбранного числа Рейнольдса.
5. Число Рейнольдса уточняется по формулам пункта 4.1.2, т.е. определяется модифицированное число Re^{**} .
6. Вычисляется относительная погрешность определения числа Рейнольдса на цикле:

$$\delta_{Re} = |(Re^* - Re^{**}) / Re^{**}| \quad (4.1)$$

7. Цикл по пунктам 4 – 6 повторяется до тех пор, пока относительная погрешность не станет менее 0.0001, т.е. до выполнения условия:

$$\delta_{Re} < 0.0001 \quad (4.2)$$

8. Последнее полученное приближение числа Рейнольдса и используется для окончательного вычисления расхода.

4.1.2 Расчет модифицированного числа Рейнольдса

4.1.2.1 Мгновенный массовый расход G_{Re} , кг/час, необходимый для определения числа Рейнольдса, вычисляется по формулам

а) для воды и пара

$$G_{Re} = 0.12645 \cdot d^2 \cdot C_v \cdot E_d \cdot \varepsilon \cdot K_{sh} \cdot K_p \cdot (dP \cdot \rho)^{0.5} \quad (4.3)$$

б) для любого вида газа в нормальных условиях

$$G_{Re} = 6.8013 \cdot d^2 \cdot C_v \cdot E_d \cdot \varepsilon \cdot K_{sh} \cdot K_p \cdot (dP \cdot K_{PT})^{0.5} \cdot \rho_C, \quad (4.4)$$

$$\text{где } K_{PT} = Pa / (\rho_C \cdot T_a \cdot K_{CЖ}). \quad (4.5)$$

4.1.2.2 Модифицированное число Рейнольдса Re вычисляется по формуле:

$$Re = 0.35368 \cdot G_{Re} / (\mu \cdot D) \quad (4.6)$$

4.1.3 Действительный мгновенный расход

4.1.3.1 Мгновенный расход газа в объемных единицах G_0 , Нм³/час, в нормальных условиях

$$G_0 = 6.8013 \cdot d^2 \cdot C_v \cdot E_d \cdot \varepsilon \cdot K_{sh} \cdot K_p \cdot (dP \cdot K_{PT})^{0.5}. \quad (4.7)$$

4.1.3.2 Мгновенный расход воды и пара в объемных единицах G_0 , м³/час

$$G_0 = 0.12645 \cdot d^2 \cdot C_v \cdot E_d \cdot \varepsilon \cdot K_{sh} \cdot K_p \cdot (dP / \rho)^{0.5}. \quad (4.8)$$

4.1.3.2 Мгновенный расход воды и пара в единицах массы G_m , т/час

$$G_m = G_{Re} / 1000. \quad (4.9)$$

4.1.3.3 Выбор расхода G_k' для вычисления средних и интегральных показателей в трубопроводе производится по (4.10). Единицы измерения G_k' зависят от настройки трубопровода.

$$G_k' = \begin{cases} G_m & \text{если учет задан в единицах массы} \\ G_0 & \text{если учет задан в единицах объема.} \end{cases} \quad (4.10)$$

4.1.3.4 Мгновенный (некорректированный) расход по сигналу датчика перепада $G_{mgд}$, м³/час, используемый только для индикации

$$G_{mgд} = G_{ном} * (dP/dP_{ном})^{0.5}, \quad (4.11)$$

где $G_{ном}$ - вторая константа используемого датчика, м³/час.

4.2 Применение датчика расхода

4.2.1 Датчики с аналоговым и частотным выходом

4.2.1.1 При использовании датчиков расхода с аналоговым или частотным выходом производится согласование единиц измерения датчика и единиц учета в трубопроводе:

$$G_k' = \begin{cases} G_{дат} & \text{единицы совпадают} \\ G_{дат} * \rho & \text{датчик в м}^3/\text{час, учет в т/час} \\ G_{дат} / \rho & \text{датчик в т/час, учет в м}^3/\text{час.} \end{cases} \quad (4.12)$$

Значение плотности среды в рабочих условиях ρ вычисляется по приведенным в разделе 3.3 формулам.

4.2.2 Числоимпульсные датчики

4.2.2.1 Поскольку такие датчики являются интегрирующими, их показания дают сразу расход за цикл работы программы $dG_{ко}'$ в тоннах, кубометрах, киловатт-часах, который в ряде случаев может корректироваться. Также производится согласование единиц измерения датчика и трубопровода.

4.2.2.2 Расход воды или пара за цикл $G_{ц}$ в учетных единицах

$$G_{ц} = \begin{cases} dG_{ко} & \text{при совпадении единиц учета} \\ 0.001 * dG_{ко} * \rho & \text{при учете расхода в тоннах и датчике в м}^3. \end{cases} \quad (4.13)$$

4.2.2.3 Измеренный в рабочих условиях расход природного газа приводится к нормальным условиям (20 градусов С, 760 мм ртутного столба) по формуле

$$G_{ц} = dG_{ко}' * \frac{T_n * P_a}{P_n * T_a * K_{сж}}, \quad (4.14)$$

где $T_n = 293.15$ градусов Кельвина, (4.15)

$P_n = 0.101325$ МПа. (4.16)

4.2.2.4 Обратным пересчетом определяется мгновенный расход в единицах учета за час:

$$G_k' = G_{ц} / dt_{ц}, \quad (4.17)$$

где $dt_{ц}$ – длительность последнего цикла расчета, часов.

Этот параметр носит справочный характер, и, особенно при малой частоте входных импульсов, может сильно колебаться.

4.2.2.5 Тепловые показатели по формулам, приведенным в следующем разделе, также относятся не к мгновенным мощностным параметрам, а к теплу за цикл расчета $Q_{ц}$.

4.2.2.6 При расчете расхода электроэнергии без учета ее стоимости или по одностарифному способу учета стоимости всегда, а при двухтарифном способе учета – только в дневное время рабочих дней, вычисляется и накапливается количество электроэнергии, потребленное по основному тарифу. Это количество накапливается взамен параметров расхода в трубопроводе. Расход за цикл определяется по формуле:

$$G_{ц} = G_{дат} \quad (4.18)$$

При двухтарифном способе учета стоимости электроэнергии в ночное время рабочих дней, а в выходные и праздничные дни круглосуточно вычисляется и накапливается количество электроэнергии, потребленное по льготному тарифу. Это количество накапливается взамен тепловых параметров в трубопроводе. Расход за цикл определяется по формуле:

$$Q_{ц} = G_{дат} \quad (4.19)$$

5 РАСЧЕТ МГНОВЕННОЙ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ

5.1 Вычисление энтальпии теплоносителя

5.1.1 Энтальпия всех видов теплоносителей (вода, перегретый пар, насыщенный пар) вычисляется в килоджоулях на килограмм, или, что то же самое, в мегаджоулях на тонну. Для расчета используется температура в точке раздела принадлежности трубопроводов $T_{ВХ}$ и давление среды P_a . Холодный источник, от которого отсчитывается переносимая теплоносителем тепловая энергия, является всегда холодной водой с температурой $T_{ХИ}$ при атмосферном давлении $P_{атр}$. Расчетные формулы взяты из [10].

5.1.2 Приведенные значения температуры и давления

$$\tau_q = (T_q + 273.15)/647.14 \quad (5.1)$$

$$\pi_q = P_q/22.064, \quad (5.2)$$

где

$$T_q = \begin{cases} T_{ВХ} & \text{трубопровод} \\ T_{ХИ} & \text{холодный источник} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$P_q = \begin{cases} P_a & \text{трубопровод} \\ P_{атр} & \text{холодный источник.} \end{cases} \quad (5.4)$$

5.1.3 Энтальпия воды h , кДж/кг

$$h = 7809.096*\tau_q - 13868.72 + 12725.22*\tau_q^{-1} - 6370.893*\tau_q^{-2} + 1595.86*\tau_q^{-3} - 159.9064*\tau_q^{-4} + \\ + \pi_q*9.488789*\tau_q^{-1} + \pi_q^2*(-148.1135*\tau_q + 224.3027 - 111.4602*\tau_q^{-1} + 18.15823*\tau_q^{-2}). \quad (5.5)$$

5.1.4 Энтальпия перегретого пара h , кДж/кг

$$h = (10258.8 - 20231.3*\tau_q^{-1} + 24702.8*\tau_q^{-2} - 16307.3*\tau_q^{-3} + 5579.31*\tau_q^{-4} - 777.285*\tau_q^{-5}) + \\ + \pi_q*(-355.878*\tau_q^{-1} + 817.288*\tau_q^{-2} - 845.841*\tau_q^{-3}) + \pi_q^2*(-160.276*\tau_q^{-3}) + \\ + \pi_q^3*(-95607.5*\tau_q^{-1} + 443740*\tau_q^{-2} - 767668*\tau_q^{-3} + 587261*\tau_q^{-4} - 167657*\tau_q^{-5}) + \\ + \pi_q^4*(22542.8*\tau_q^{-2} - 84140.2*\tau_q^{-3} + 104198.0*\tau_q^{-4} - 42886.7*\tau_q^{-5}). \quad (5.6)$$

5.1.5 Энтальпия насыщенного пара h , кДж/кг

$$h = 2149.17 + 15049.8*\tau_q^3 - 38597.1*\tau_q^4 + 38206.2*\tau_q^5 - 14351.7*\tau_q^6. \quad (5.7)$$

5.2 Тепловая мощность

5.2.1 Вычисление тепловой мощности для воды и пара требует знания массового расхода теплоносителя G_{mk} , т/час:

а) при наличии датчика перепада

$$G_{mk} = \begin{cases} G_k' & \text{трубопровод с массовым расходом} \\ G_k' \cdot \rho & \text{трубопровод с объемным расходом} \end{cases} \quad (5.8)$$

б) при наличии датчика расхода

$$G_{mk} = \begin{cases} G_k' & \text{трубопровод с массовым расходом, датчик с объемным расходом} \\ G_{\text{дат}} \cdot \rho & \text{трубопровод и датчик с объемным расходом} \\ G_{\text{дат}} & \text{трубопровод с объемным расходом, датчик массового расхода} \end{cases} \quad (5.9)$$

в) при отсутствии собственного расходомерного узла и наличии ссылки на другой трубопровод (например, для обратной трубы ссылка на прямую)

$$G_{mk} = G_{mk}(L) \cdot P_{\text{РАСХ}}, \quad (5.10)$$

где

$G_{mk}(L)$ - расход в трубопроводе с номером L ;
 $P_{\text{РАСХ}}$ - заданная в описании трубопровода часть расхода от 0 до 1.

5.2.2 Мгновенная тепловая мощность горячей воды или пара в данной трубе Q_{mg} , Гкал/час или ГДж/час:

$$Q_{mg} = 0.001 \cdot C_{\text{дк}} \cdot G_{mk} \cdot (h - h_{\text{хи}}), \quad (5.11)$$

где

$$C_{\text{дк}} = \begin{cases} 1 & \text{при заданном учете в ГДж} \\ 1/4.1868 & \text{при заданном учете в Гкал} \end{cases} \quad (5.12)$$

h - энтальпия теплоносителя,
 $h_{\text{хи}}$ - энтальпия холодного источника.

5.2.3 Мгновенная тепловая мощность природного газа Q_{mg} определяется пересчетом его расхода в эквивалентное количество условного топлива калорийностью 7000 ккал/кг, и измеряется в тоннах условного топлива в час:

$$Q_{mg} = \frac{G_k' \cdot Q_k}{7000}, \quad (5.13)$$

где

$$Q_k = \begin{cases} Q_n / 1000 & \text{калорийность газа выражена в ккал/Нм}^3 \\ Q_n \cdot 4.187 & \text{калорийность газа выражена в МДж/Нм}^3. \end{cases} \quad (5.14)$$

При этом подразумевается, что расход газа G_k' всегда является объемным и выражен в $\text{Нм}^3/\text{час}$.

5.2.4 Взамен параметра тепловой мощности для технического газа вычисляется его массовый расход в килограммах за час:

$$Q_{mg} = \rho_c \cdot G_k' \quad (5.15)$$

При этом подразумевается, что расход газа G_k' всегда является объемным и выражен в $\text{Нм}^3/\text{час}$.

5.2.5 Взамен параметров тепловой мощности при двухтарифном учете электроэнергии вычисляется расход электроэнергии, оплачиваемый по льготному тарифу (см. 4.2.2.6 и 6.2.1).

6 ПРОЧИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

6.1 Средние и интегральные показатели

6.1.1 Определение длительности основного цикла расчета $dt_{Ц}$, часов:

$$dt_{Ц} = \begin{cases} ta_1 - ta_2 & \text{в течение суток} \\ ta_1 - (ta_2 - 24) & \text{при переходе через сутки,} \end{cases} \quad (6.1)$$

где ta_1 и ta_2 - астрономическое время конца и начала текущего цикла, взятое с точностью 1/125с и выраженное в часах (с плавающей точкой).

6.1.2 Расход и количество тепловой энергии за цикл расчета (только для аналоговых и частотных датчиков) в учетных единицах

$$G_{Ц} = G_k * dt_{Ц} \quad (6.2)$$

$$Q_{Ц} = Q_{mg} * dt_{Ц}. \quad (6.3)$$

Для числоимпульсных датчиков эта операция интегрирования не требуется.

6.1.3 Накопление суммарных и вычисление средних расходов и количества тепловой энергии за интервал измерения, за час, за сутки и месяц производится аналогично таким процедурам для датчиков, см. 1.2.1.4. При добавлении суточного расхода и количества тепловой энергии к месячным значениям суточные параметры предварительно делятся на задаваемый при описании трубопровода коэффициент $K_{ПЕР}$, выбираемый так, чтобы месячные значения этих параметров не превысили максимально возможного на индикаторах ТЭКОН числа с плавающей точкой 8388607. Таким образом, единицы измерения в месяце увеличиваются в $K_{ПЕР}$ раз. В отличие от датчиков, имеются еще параметры интегрального расхода и количества тепловой энергии по трубопроводу, добавление в которые происходит также ежесуточно, но это целые положительные числа от 0 до 255999999, единицы измерения в них также увеличены в $K_{ПЕР}$ раз.

6.1.4 При необходимости суммирования или вычитания расходов или количества тепловой энергии в двух или более трубопроводах эта операция выполняется при записи в архивы или с помощью аппарата «условных датчиков». Эти операции описаны в РЭ на ТЭКОН [1].

6.2 Расчет стоимости электроэнергии

6.2.1 Расчет стоимости

6.2.1.1 При однотарифном способе учета расчет стоимости электроэнергии производится один раз в сутки, в момент наступления расчетного часа, по формуле:

$$S_{\text{сут}} = G_{\text{сут}} * W_{\text{осн}}, \quad (6.4)$$

где $S_{\text{сут}}$ - стоимость электроэнергии за сутки, рублей;
 $G_{\text{сут}}$ - накопленное за истекшие сутки количество электроэнергии, квт*ч;
 $W_{\text{осн}}$ - заданный основной тариф, рублей/квт*ч.

Аналогично производится расчет стоимости любого другого энергоносителя, если это задано при настройке ТЭКОН. В зависимости от заданного способа оплаты, в качестве $G_{\text{сут}}$ берется либо накопленный за истекшие сутки расход, либо суточное количество тепловой энергии.

6.2.1.2 При двухтарифном способе учета, разрешаемом для потребителей с присоединенной нагрузкой не более 750 кВА, в течение суток ведется отдельный учет количества электроэнергии по основному и льготному тарифам. Стоимость потребленной за сутки электроэнергии определяется один раз в сутки по формуле:

$$S_{\text{сут}} = G_{\text{осн}} * W_{\text{осн}} + G_{\text{льгот}} * W_{\text{льгот}} \quad (6.5)$$

где $S_{\text{сут}}$ - стоимость электроэнергии за сутки, рублей;
 $G_{\text{осн}}$ - количество электроэнергии, квт*ч, накопленное за время действия в истекшие сутки основного тарифа
 $W_{\text{осн}}$ - заданный основной (дневной) тариф, рублей/квт*ч.
 $G_{\text{льгот}}$ - количество электроэнергии, квт*ч, накопленное за время действия в истекшие сутки льготного тарифа
 $W_{\text{льгот}}$ - заданный льготный (ночной) тариф, рублей/квт*ч.

6.2.1.3 При двухтарифном способе учета электроэнергии принято, что основной тариф действует в рабочие дни с заданного при настройке ТЭКОН момента начала $ЧЧ_{\text{нач}}$ 00 минут до заданного момента окончания $ЧЧ_{\text{кон}}$ 00 минут. Льготный тариф действует в рабочие дни с 00 часов 00 минут до $ЧЧ_{\text{нач}}$ 00 минут и с $ЧЧ_{\text{кон}}$ 00 минут до 24 часов 00 минут, а в субботние, воскресные и праздничные дни – круглосуточно. Список праздничных дней определяется законодательством Российской Федерации и включает в себя следующие даты:

- 1, 2, 3, 4, 5, 7 января
- 23 февраля
- 8 марта
- 1, 9 мая
- 12 июня
- 4 ноября.

Основной список праздничных дат является заводской константой ТЭКОН и пользователем изменен быть не может. Однако имеется дополнительный список отмененных и назначенных выходных, который пользователь может оперативно откорректировать при переносе праздничных дней.

6.2.1.4 При любом заданном способе вычисления стоимости ежесуточно корректируется сумма оплаты текущего месяца $S_{\text{мес}}$, рублей:

$$S_{\text{мес}} = S_{\text{мес}} + S_{\text{сут}} \quad (6.6)$$

По окончании расчетного месяца, в момент наступления расчетного часа расчетной даты накопленная сумма переносится в предыдущий месяц, после чего очищается, и ее накопление начинается заново.

6.2.2 Определение дня недели

6.2.2.1 Дата, месяц и год определяются по показаниям системных часов ТЭКОН и при необходимости могут быть откорректированы пользователем. День недели вычисляется автоматически по текущей дате.

6.2.2.2 Число дней, прошедшее от 28.02.1900 года до текущей даты ДД ММ ГГГГ

$$T = \text{int}(365.25 * \Gamma) + \text{int}(30.6 * M) + D - 694066, \quad (6.7)$$

где

Д=ДД число месяца,

М - условный номер месяца

$$M = \begin{cases} MM+13 & \text{при } MM < 3 \text{ (январь, февраль)} \\ MM+1 & \text{при } MM \geq 3 \text{ (с марта по декабрь),} \end{cases} \quad (6.8)$$

Г - условный номер года

$$\Gamma = \begin{cases} ГГГГ & \text{при } MM \geq 3 \\ ГГГГ - 1 & \text{при } MM < 3 \end{cases} \quad (6.9)$$

Int – операция выделения целой части числа.

6.2.2.3 Условный день недели (0-воскресенье, 1-понедельник, .. , 6-суббота)

$$N = \text{mod}7(T), \quad (6.10)$$

где mod7 – операция взятия остатка по модулю 7.

6.2.2.4 Реальный день недели (1 - понедельник, 2 - вторник, .. , 7 - воскресенье)

$$H = \begin{cases} N & \text{при } N > 0 \\ 7 & \text{при } N = 0. \end{cases} \quad (6.11)$$

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теплоэнергоконтроллер ТЭКОН-17. Руководство по эксплуатации Т10.00.41 РЭ. Редакция 40.00. ИВП «КРЕЙТ», г. Екатеринбург, 2007 г.
2. ГОСТ 8.586.1-2005.
Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования.
3. ГОСТ 8.586.2-2005.
Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования.
4. ГОСТ 8.586.5-2005.
Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений.
5. ГОСТ 30319.0-96
Газ природный. Методы расчета физических свойств. Общие положения.
6. ГОСТ 30319.1-96
Газ природный. Методы расчета физических свойств.
Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки.
7. ГОСТ 30319.2-96
Газ природный. Методы расчета физических свойств.
Определение коэффициента сжимаемости.
8. ГОСТ 30319.3-96
Газ природный. Методы расчета физических свойств.
Определение физических свойств по уравнению состояния.
9. МИ 2412-97. ГСИ.
Рекомендация. Водяные системы теплоснабжения.
Уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя.
10. МИ 2451-98. ГСИ.
Рекомендация. Паровые системы теплоснабжения.
Уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя.
11. ГСССД 187-89
Вода. Удельный объем и энтальпия при температурах 0 – 1000 градусов и давлениях 0.001 – 1000 МПа.
12. ГОСТ 6651-94
Термопреобразователи сопротивления.
Общие технические требования и методы испытаний.
13. ГОСТ Р 8.585-2001
Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования.
14. Теплоэнергоконтроллер ТЭКОН-17. Инструкция по настройке Т10.00.41 ИН. Редакция 40.00. ИВП «КРЕЙТ», г. Екатеринбург, 2007 г.
15. ПР 50.2.019-2006
ГСИ. Количество природного газа. Методика выполнения измерений с помощью турбинных или ротационных счетчиков.