

## Теплосчетчики: назад, к простым приборам. Измерительные системы: вперед, к умным системам!

*Шинелев А.А., Бурдуний М.Н.*

При учете тепла и воды сложилась практика замены измеренного значения параметра на договорное при выходе измеряемой величины за номинальный диапазон измерения, подкрепленная нормативной документацией.

Для каждой величины  $X$  (где  $X$  – это расход  $G$ , температура  $t$ , давление  $P$  и т.д.) говорится о ее измеренном значении  $X_{\text{изм}}$  и обработанном  $X_{\text{обр}}$  (в дальнейшем индекс "обр" будет опускаться:  $X=X_{\text{обр}}$ ). Номинальный диапазон измерения величины  $X$  ограничен ее минимальным и максимальным значениями  $X_{\text{min}}$  и  $X_{\text{max}}$  (или минимум  $X$  и максимум  $X$ ). В номинальном диапазоне  $X=X_{\text{изм}}$ , при  $X_{\text{изм}} < X_{\text{min}}$  обработанное значение величины  $X$  приравнивается нижнему договорному значению:  $X=X_{\text{дн}}$ , при  $X_{\text{изм}} > X_{\text{max}}$  обработанное значение величины  $X$  приравнивается верхнему договорному значению:  $X=X_{\text{дв}}$ .

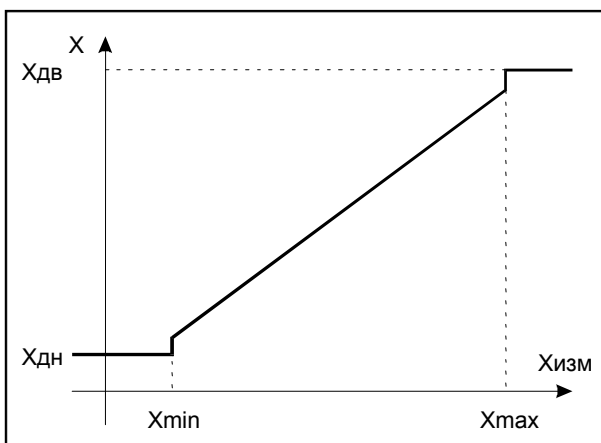


Рис. 1.

Рисунок 1 иллюстрирует правила обработки величины  $X$  (далее по тексту – алгоритм обработки). В общем случае  $X_{\text{дн}}$  и  $X_{\text{дв}}$  могут быть любыми, в т.ч. равными нулю. Выбор величины  $X_{\text{дн}}$  и  $X_{\text{дв}}$  лежит в сфере договорных отношений.

Интервал  $[X_{\text{min}}, X_{\text{max}}]$  является диапазоном, в котором нормирована относительная или абсолютная погрешность измерения величины

Х. При  $X_{\text{изм}} < X_{\text{min}}$  или  $X_{\text{изм}} > X_{\text{max}}$  прибор, как правило, может производить измерения, но в общем случае с погрешностью, превышающей некоторую предельную величину для данного типа измерений.

Анализ данных, полученных в процессе эксплуатации автоматизированной системы коммерческого учета энергоресурсов «ГИС ТБН Энерго» в г. Москве показывает, что применение алгоритма обработки может приводить к:

- получению данных, искажающих реальный объем потребленных ресурсов;
- увеличению неопределенности результатов измерения по сравнению с исходной неопределенностью необработанных данных.

Рассмотрим влияние применения алгоритма обработки на результат измерений расхода теплоносителя, горячей и холодной воды.

Как правило, расход теплоносителя в системах отопления на относительно небольших временных интервалах (несколько часов) стабилен. Значение расхода колеблется в небольших пределах относительно среднего значения. В системах ГВС и ХВС картина совершенно иная. На протяжении суток расход изменяется в значительных пределах, достигая минимума ночью (в 4-5 часов ночи) и максимума в утренние и дневные часы. На рисунке 2 приведен типичный график мониторинга расхода в системе ЦО, на рисунке 3 – графики изменения среднечасового расхода в системах ГВС и ХВС (данные получены при эксплуатации автоматизированной системы диспетчерского контроля и коммерческого учета «ГИС ТБН Энерго» в ДЕЗ Чертаново Южное, г. Москва).

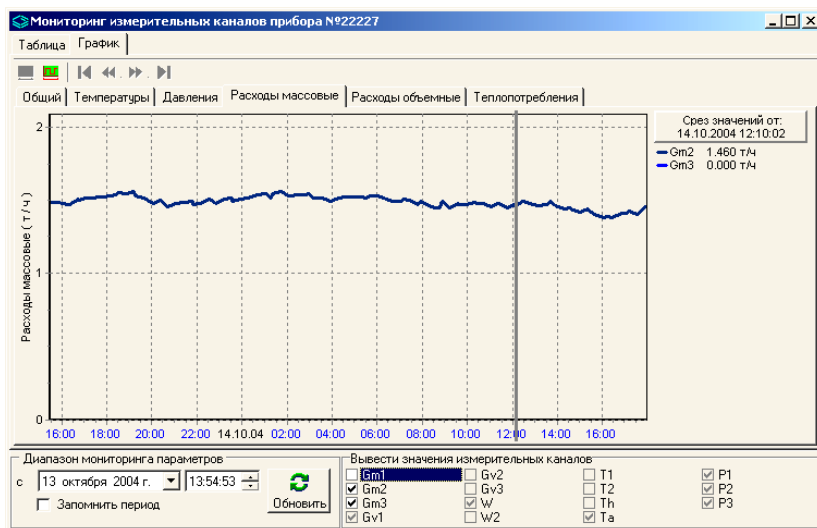


Рис. 2.

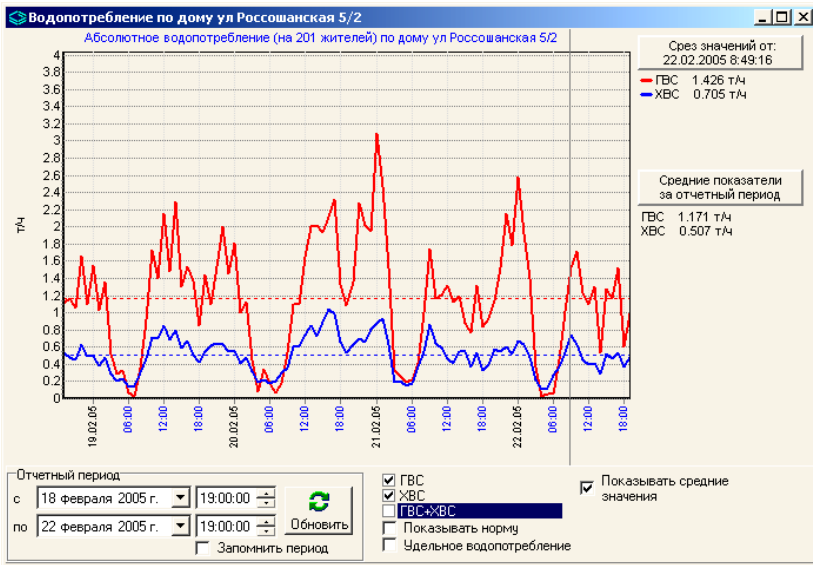


Рис. 3.

Рассмотрим два характерных и в то же время наиболее неблагоприятных с точки зрения измерений случая.

1) Измеряемый расход постоянен на промежутке 1 час и близок по величине к нижнему или верхнему значению.

2) Измеряемый расход на промежутке 1 час линейно изменяется от величины  $G_0$ , лежащей в номинальном диапазоне измерений  $[G_{min}, G_{max}]$ , до нуля.

Измеренное значение расхода является случайной величиной и его можно представить в виде

$$G_{изм} = \bar{G}(\tau) + G(x) + G(y) \pm \Delta G, \quad (1)$$

где  $\bar{G}(\tau)$  - составляющая, обусловленная изменением среднего значения расхода измеряемого потока,  $\tau$  - время в сек,

$G(x)$  - случайная пульсационная составляющая, обусловленная пульсациями  $(x)$  измеряемого потока;

$G(y)$  - случайная измерительная составляющая, обусловленная шумами  $(y)$  в канале  $G$  теплосчетчика и являющаяся случайной составляющей погрешности измерений;

$\Delta G$  - составляющая, обусловленная систематической составляющей погрешности измерений.

Рассмотрим составляющие правой части формулы (1).

В рассматриваемых нами случаях первая составляющая равна:

$$\overline{G}(\tau) = G_0 = const \quad - \text{ в первом случае,} \quad (2)$$

$$\overline{G}(\tau) = G_0(1 - \tau/3600) \quad - \text{ во втором случае.} \quad (3)$$

С достаточной степенью точности можно считать, что  $G(x)$  и  $G(y)$  являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону и имеющими нулевые средние значения. Их сумма также является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с нулевым средним значением:

$$G_{сл} = G(x) + G(y), \quad \overline{G}_{сл} = \overline{G}(x) = \overline{G}(y) = 0. \quad (4)$$

Пульсационная составляющая пропорциональна амплитуде турбулентных пульсаций потока. Для приблизительной оценки максимального значения амплитуды ( $x$ , м<sup>3</sup>/ч) и периода ( $T$ , сек) турбулентных пульсаций можно воспользоваться формулами [1]:

$$x = 1.20 \cdot \lambda^{0.55} \cdot G. \quad (5)$$

$$T = 0.0014 \cdot D^3 / G. \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $D$  – внутренний диаметр трубопровода, мм;  $G$  – расход, м<sup>3</sup>/ч.

Коэффициент гидравлического трения можно оценить по формуле Блазиуса

$$\lambda = 0.3164 \cdot Re^{-1/4}, \quad (7)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса;  $Re = uD/\nu$ .

Для оценки типичного значения  $G_{сл}$  и  $\overline{G}(y)$  воспользуемся экспериментальными данными, полученными при градуировке электромагнитного теплосчетчика КМ-5, Ду=40мм.

В Таблице 1 приведены экспериментальные значения эталонного расхода  $G_{э}$ , среднего значения  $G_{ср}$  и стандартного отклонения  $s$  измеренного расхода:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (G_k - G_{cp})^2}{N-1}} \quad (8)$$

Там же приведены значения абсолютной  $\Delta G$  и относительной  $\delta G$  погрешности, пределов относительной погрешности  $\delta G_H$  для каналов расхода теплосчетчиков класса С по ГОСТ Р 51649-2000 ( $\delta G_H = 1+0.01 \cdot G_{max}/G$ ,  $G_{max} = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$  для КМ-5 Ду = 40мм), а также рассчитанные значения средней скорости потока  $u$ , числа Рейнольдса  $Re$ , коэффициента гидравлического трения  $\lambda$ , максимального значения амплитуды  $x$  и периода  $T$  турбулентных пульсаций.

Таблица 1.

N	$G$ $\text{м}^3/\text{ч}$	$G_{cp}$ $\text{м}^3/\text{ч}$	$s$ $\text{м}^3/\text{ч}$	$\Delta G$ $\text{м}^3/\text{ч}$	$\delta G$ %	$\delta G_H$ %	$u$ $\text{м}/\text{с}$	$Re$	$\lambda$	$x$ $\text{м}^3/\text{ч}$	$T$ $\text{с}$
1	25.935	25.824	0.064	-0.111	-0.43	1.02	5.733	221302	0.0146	3.043	3.455
2	25.654	25.840	0.062	0.185	0.72	1.02	5.671	218905	0.0146	3.014	3.493
3	2.940	2.963	0.011	0.023	0.77	1.14	0.650	25087	0.0251	0.465	30.48
4	2.942	2.965	0.012	0.024	0.81	1.14	0.650	25101	0.0251	0.466	30.46
5	2.950	2.965	0.012	0.015	0.49	1.14	0.652	25173	0.0251	0.467	30.37
6	1.040	1.052	0.008	0.011	1.10	1.38	0.230	8875	0.0326	0.190	86.14
7	1.041	1.053	0.008	0.012	1.14	1.38	0.230	8881	0.0326	0.190	86.09
8	0.150	0.152	0.003	0.003	1.83	3.67	0.033	1276	0.0529	0.036	599.1
9	0.150	0.152	0.002	0.003	1.86	3.68	0.033	1276	0.0529	0.036	599.2
10	0.089	0.091	0.003	0.002	2.06	5.49	0.020	760	0.0603	0.023	1006
11	0.087	0.088	0.002	0.002	1.82	5.60	0.019	742	0.0606	0.022	1031
12	0.087	0.089	0.002	0.002	2.10	5.60	0.019	741	0.0606	0.022	1031
13	0.061	0.063	0.002	0.001	2.15	7.51	0.014	524	0.0661	0.017	1459
14	0.061	0.063	0.003	0.001	2.26	7.52	0.014	523	0.0662	0.017	1461
15	0.000	0.000	0.003	0.000			0.000	0		0	
16	0.000	0.000	0.003	0.000			0.000	0		0	
17	0.000	0.000	0.003	0.000			0.000	0		0	

Оценка амплитуды турбулентных пульсаций дает достаточно большую величину  $x$ .

Однако следует иметь в виду, что это лишь оценка максимально

возможных значений  $x$ .

Формулы (5), (6) получены из зависимости между критерием Кармана и коэффициентом гидравлического трения при максимальном размере турбулентного вихря, равного радиусу трубопровода.

На практике в большинстве случаев  $x$  будет в несколько раз меньше и с меньшим периодом. К тому же сигнал  $G(x)$ , соответствующий  $x$  будет демпфирован за счет пространственного усреднения, т.к. сигнал электромагнитных преобразователей расхода формируется во всем объеме потока, заполненным магнитным полем индуктора.

Тем не менее, между стандартным отклонением измеренного расхода и расчетным значением амплитуды турбулентных пульсаций имеется линейная связь с очень большим уровнем достоверности аппроксимации  $R=0.9987$  (см. рис. 4).

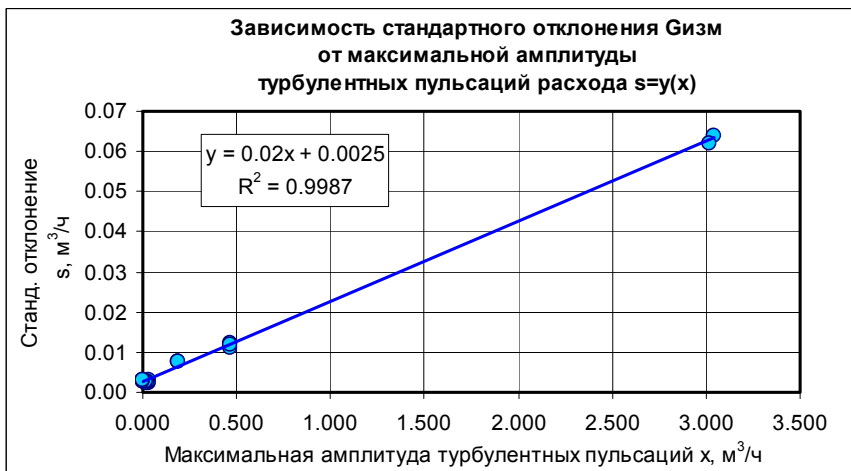


Рис. 4.

Это говорит о том, что турбулентные пульсации делают вклад в пульсации измеренного расхода при больших и средних расходах (по крайней мере, в случае электромагнитных ПР с  $D_y=40$ мм).

При малых значениях расхода пульсации  $G_{изм}$  определяются в основном шумами в канале  $G$  теплосчетчика.

По экспериментальным данным, приведенным в Таблице 1 можно построить зависимость стандартного отклонения измеренного расхода от величины расхода (см. Рисунок 4).

Экспериментальные значения  $s$  очень хорошо описываются линей-

ной функцией с уровнем достоверности аппроксимации  $R=0.9957$ :

$$s(G) = 0.0023 \cdot G + 0.0035. \quad (9)$$

*Примечание:* на рисунке 5 линейная зависимость (9) выглядит как кривая линия из-за логарифмического масштаба по оси абсцисс.

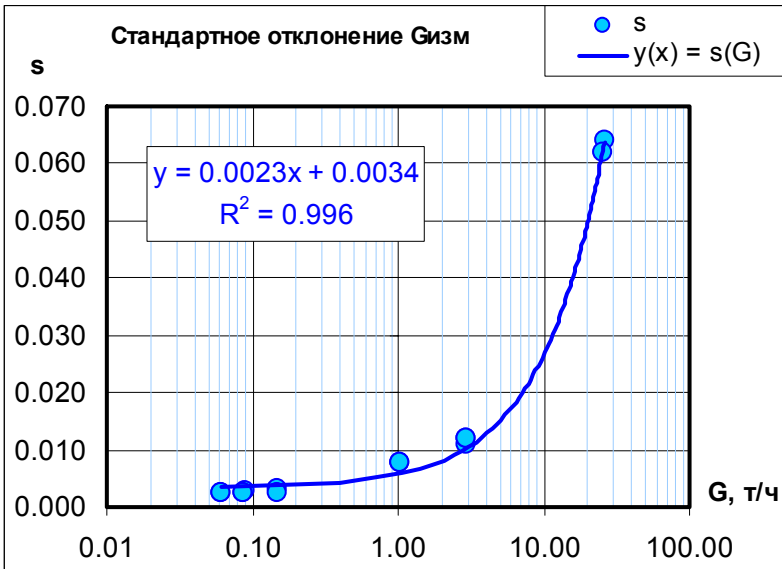


Рис. 5. Зависимость стандартного отклонения измеренного расхода от величины расхода.

Таким образом, суммарную случайную составляющую  $G_{сл}$  измеренного расхода можно смоделировать случайной величиной, распределенной по нормальному закону с нулевым средним значением и стандартным отклонением  $s(G)$ , зависящей от расхода по формуле (9):

$$G_{сл} = (0.0023 \cdot G + 0.0035) \cdot \xi, \quad (10)$$

где  $\xi$  - случайная величина, распределенная по нормальному закону с нулевым средним значением и стандартным отклонением  $s(\xi)=1$ .

Для оценки величины  $\Delta G$  возьмем предел относительной погрешности для каналов расхода теплосчетчиков класса С по ГОСТ Р 51649-2000:

$$\Delta G = 0.01 \cdot G \cdot \delta G_H = 0.01 \cdot G(1 + 0.01 G_{\max}/G) = 0.01 \cdot G + 0.0001 \cdot G_{\max}. \quad (11)$$

Для электромагнитного преобразователя расхода Ду=40  $G_{\max} = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ , поэтому:

$$\Delta G = 0.01 \cdot G + 0.004 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (12)$$

С учетом (10) и (12) получим формулу для моделирования измеренных значений расхода в трубопроводе Ду=40 с помощью типичного электромагнитного преобразователя расхода:

$$G_{\text{изм}} = \bar{G}(\tau) + (0.0023 \cdot \bar{G}(\tau) + 0.0035) \cdot \xi \pm (0.01 \cdot \bar{G}(\tau) + 0.004) \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (13)$$

На рисунках 6 и 7 приведены экспериментальные и смоделированные значения измеренного расхода при большом ( $26 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и малом ( $0.06 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) значениях расхода. Видно, что модель (13) корректно описывает поведение измеренного расхода.

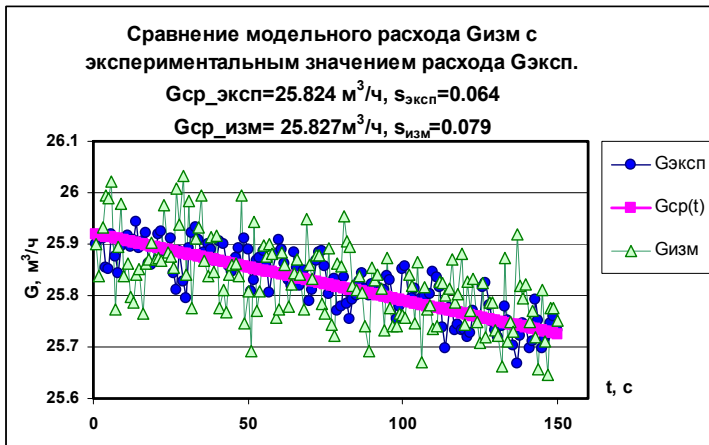


Рис. 6.



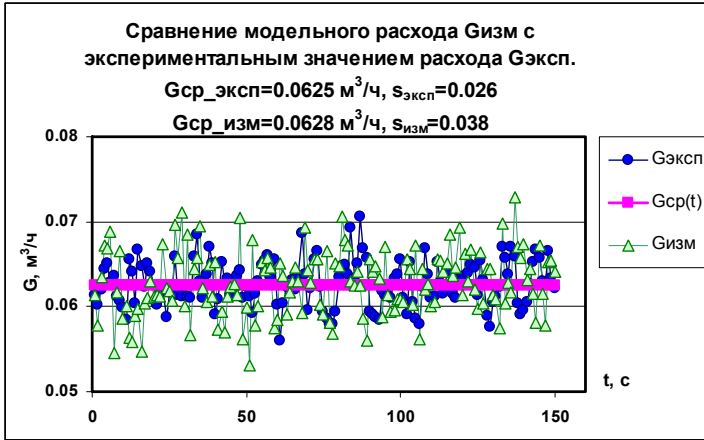


Рис. 7.

Итак, рассмотрим измерение среднечасового объема одним из каналов расхода теплосчетчика класса С по ГОСТ Р 51649-2000, имеющего диапазон измерения расхода  $[G_{max}; G_{min}] = [40; 0.4] \text{ м}^3/\text{ч}$  (динамический диапазон 1:100 при уровне относительной погрешности 2%).

**Случай 1.**  $\overline{G}(\tau) = G_0 = const.$

Пусть измеряемый расход на промежутке 1 час близок к  $G_{min} = 0.4 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Вычислим относительную погрешность измерения среднечасового объема без обработки измеренных значений  $\delta V$  и с обработкой измеренных значений расхода при  $G_{дн} = G_{min}$  и при  $G_{дн} = 0$  (соответственно  $\delta V(G_{дн} = G_{min})$  и  $\delta V(G_{дн} = 0)$ ).

Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай, когда систематическая погрешность равна минус  $\Delta G$ :

$$G_{изм} = \overline{G}(\tau) + (0.0023 \cdot \overline{G}(\tau) + 0.0035) \cdot \xi - (0.01 \cdot \overline{G}(\tau) + 0.004) \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (13)$$

На рисунке 8 приведен график измеренных и обработанных значений  $G_{изм}$  при  $G_0 = 0.41$ ,  $G_{min} = 0.4$  и  $G_{дн} = 0.4$ .

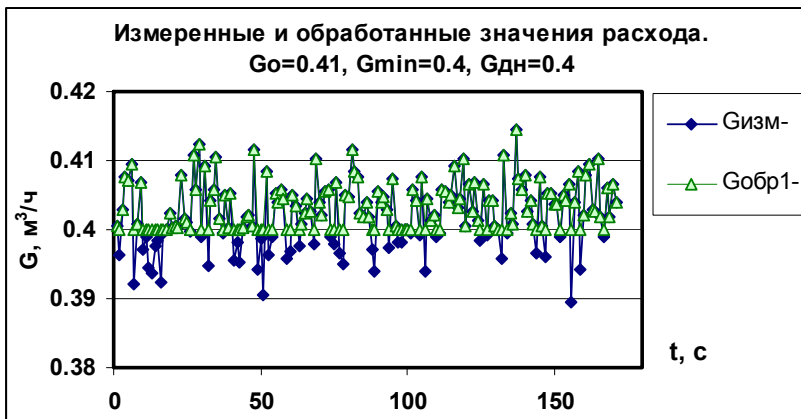


Рис. 8.

В Таблице 2 приведены значения погрешностей  $\delta V$ ,  $\delta V(G_{\text{дн}} = G_{\min})$  и  $\delta V(G_{\text{дн}} = 0)$  в зависимости от уровня среднего расхода.

Пусть измеряемый расход на промежутке 1 час близок к  $G_{\max} = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

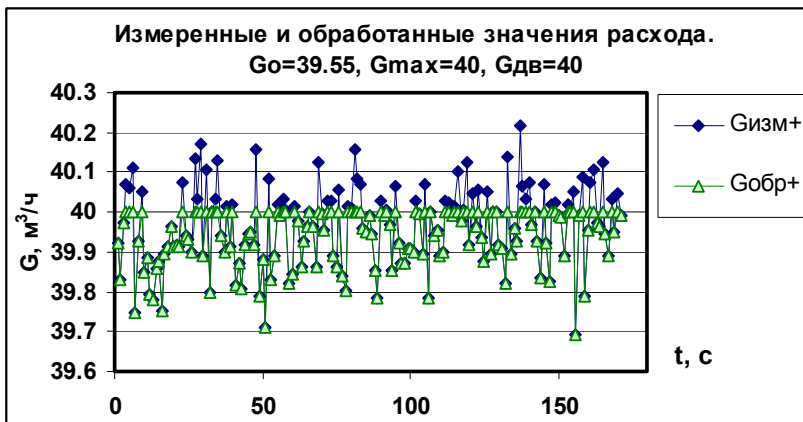
Таблица 2.

$G_0, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.36	0.38	0.4	0.41	0.415	0.42	0.42
$\delta V, \%$	-2.11	-2.05	-2	-1.98	-1.97	-1.95	-1.93
$\delta V(G_{\text{дн}} = G_{\min}), \%$	11.11	5.26	0.02	-1.73	-1.94	-1.95	-1.93
$\delta V(G_{\text{дн}} = 0), \%$	-100	-100	-96.57	-33.52	-8.68	-2.3	-1.93

Вычислим  $\delta V$ ,  $\delta V(G_{\text{дв}} = G_{\max})$  и  $\delta V(G_{\text{дв}} = 0)$  в зависимости от уровня среднего расхода.

Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай, когда систематическая погрешность равна плюс  $\Delta G$ :

$$G_{\text{изм}} = \bar{G}(\tau) + (0.0023 \cdot \bar{G}(\tau) + 0.0035) \cdot \xi + (0.01 \cdot \bar{G}(\tau) + 0.004) \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (14)$$



На рисунке 9 для примера приведен график измеренных и обработанных значений Гизм при  $G_0 = 39.55$ ,  $G_{\max} = 40$  и  $G_{\text{дв}} = 40$ .

В Таблице 3 приведены значения погрешностей  $\delta V$ ,  $\delta V(G_{\text{дв}} = G_{\max})$  и  $\delta V(G_{\text{дв}} = 0)$  в зависимости от уровня среднего расхода.

**Случай 2.**  $\bar{G}(\tau) = G_0(1 - \tau/3600)$ .

Пусть измеряемый расход на промежутке 1 час линейно изменяется от величины  $G_0$ , лежащей в номинальном диапазоне измерений [ $G_{\min}$ ,  $G_{\max}$ ], до нуля.

Вычислим относительную погрешность измерения среднечасового объема без обработки измеренных значений  $\delta V$  и с обработкой измеренных значений расхода при  $G_{дн} = G_{min}$  и при  $G_{дн} = 0$  (соответственно  $\delta V(G_{дн} = G_{min})$  и  $\delta V(G_{дн} = 0)$ ).

Таблица 3.

$G_0, \text{м}^3/\text{ч}$	38	39.55	40	42	45	48	50
$\delta V, \%$	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
$\delta V(G_{дв} = G_{max}), \%$	1.01	0.97	0	-4.76	-11	-16.67	-20
$\delta V(G_{дв} = 0), \%$	1.01	-29.35	-100	-100	-100	-100	-100

В рассматриваемом случае неважно, чему равна систематическая погрешность - плюс или минус  $\Delta G$ . Для определенности возьмем нижний предел - минус  $\Delta G$ :

$$G_{изм} = \bar{G}(\tau) + (0.0023 \cdot \bar{G}(\tau) + 0.0035) \cdot \xi - (0.01 \cdot \bar{G}(\tau) + 0.004) \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (15)$$

На рисунке 10 приведен график измеренных и обработанных значений  $G_{изм}$  при  $G_0=0.41$ ,  $G_{min}=0.4$  и  $G_{дн}=0.4$ .

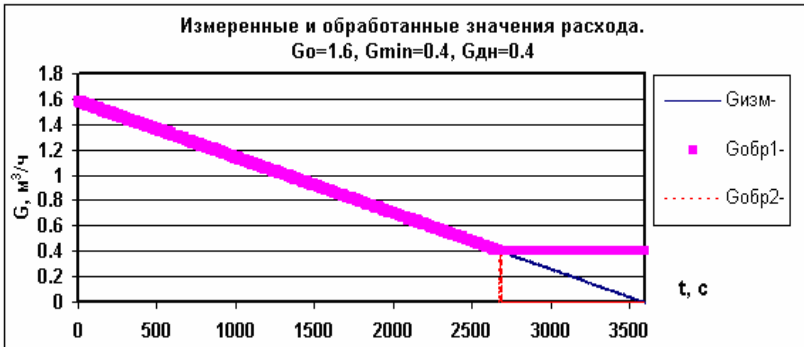


Рис. 10.

В таблице 4 приведены значения погрешностей  $\delta V(G_{дн} = G_{min})$  и  $\delta V(G_{дн} = 0)$  в зависимости от расхода.

Таблица 4.

$G_0, \text{м}^3/\text{ч}$	40	10	5	1.6	1	0.85	0.6
$\delta V, \%$	-1.05	-1.11	-1.19	-1.53	-1.83	-1.97	-2.36
$\delta V(G_{дн}=G_{min}), \%$	-1.04	-0.94	-0.53	4.91	14.67	20.86	43.47
$\delta V(G_{дн}=0), \%$	-1.06	-1.27	-1.83	-7.84	-17.97	-24.24	-47.68

## **Выводы.**

1. Полученные оценки ясно показывают, что применение алгоритма обработки измеренных значений расхода в некоторых случаях приводит к значительному ухудшению точности измерения накопленного объема теплоносителя, горячей и холодной воды и как следствие, к искажению результата измерения *реального объема потребленных ресурсов*.

Особенно ярко это может проявиться при учете холодной и горячей воды. Стоит еще раз задуматься над вопросом: «Теплосчетчики: назад, к простым приборам?» [2].

2. При работе теплосчетчиков в составе автоматизированных систем коммерческого учета энергоресурсов *необходимо отказаться от замены интеллектуальными приборами учета измеренных значений параметров договорными значениями*.

Приборы учета (измерительные компоненты системы) должны фиксировать в своем архиве измеренные параметры, в архиве событий – информацию о выходе параметров из нормированного диапазона измерений и передавать эту информацию для окончательной обработки в программный компонент системы (сервер).

Иначе, для корректной обработки первичной измерительной информации, необходимо существенно усложнить вычислители приборов учета и тем самым увеличить их стоимость.

## **Литература:**

1. Цейтлин В.Г. Расходоизмерительная техника. – М.: Издательство стандартов, 1977.
2. Медведев В.А., Бурдунин М.Н., Шинелев А.А. Теплосчетчики: назад, к простым приборам? Материалы 20-й Международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей» - СПб.: издательство «Борей-Арт», отпечатано в ООО «Политехника-сервис», 2004.

Сведения об авторах:

**Бурдунин М.Н.**, технический директор ООО «ТБН энергосервис»,  
**Шинелев А.А.**, зам. ген. директора по научно-техническим вопросам ООО «ТБН энергосервис».

105066, г. Москва, ул. Доброслободская, д.6, стр.1,

тел/факс. (095) 775-81-35, 775-81-35.

E-mail: shinelev@tbnergo.com, burdunin@tbnergo.com.