Методическая ошибка при линейной аппроксимации характеристик погрешности расходомеров

А. Г. Сафин, В. М. Кузовков

В последнее время появилось множество публикаций, посвященных различным проблемам в области учета потребления тепловой энергии, в основе которых лежит метод определения характеристики взаимного расхождения каналов измерения расхода с помощью линейной аппроксимации. Данная публикация посвящена методической ошибке, допускаемой авторами статей при применении указанного метода.

Как известно, в системах теплоснабжения с открытым водоразбором необходимо измерять значение расхода в подающем трубопроводе, определяющее расход тепловой энергии на отопление, значение массы теплоносителя, отобранного из системы на нужды горячего водоснабжения (ГВС) и массу утечки. Потребление тепловой энергии для такой системы рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = M_1(h_1 - h_2) + (M_{ГВС} + M_У)(h_2 - h_{ХВ}), \quad (1)$$

где Q - потребленная тепловая энергия;

M_1 - значение массы теплоносителя, прошедшего через подающий трубопровод;

h_1, h_2 - энтальпия теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе, соответственно;

$M_{ГВС}$ - масса теплоносителя, отобранного на нужды ГВС;

$M_У$ - масса утечки теплоносителя.

Масса теплоносителя, отобранного на нужды ГВС, определяется по показаниям водосчетчика, установленного в трубопровод ГВС. Масса утечки определяется расчетным способом по выражению:

$$M_У = M_1 - M_2 - M_{ГВС}, \quad (2)$$

где M_2 - значение массы теплоносителя, прошедшего через обратный трубопровод;

Подставляя (2) в (1), получаем выражение для расчета потребления тепловой энергии в системах с открытым водоразбором в отопительный период:

$$Q = M_1(h_1 - h_2) + (M_1 - M_2)(h_2 - h_{ХВ}). \quad (3)$$

Фактически в отопительный период показания $M_{ГВС}$ не участвуют в расчетах, а используются только для контроля и для расчетов в межотопительный период. Замена прямых измерений $M_{ГВС}$ на косвенные измерения эквивалентна математически, но не эквивалентна метрологически. Определение массы теплоносителя, отобранного из системы, по разности показаний M_1 и M_2 может привести к достаточно большой методической ошибке определения массы теплоносителя, отобранного из системы отопления. «Контрольные» показания расходомера, установленного в трубопроводе ГВС, должны служить для определения этой ошибки, но только при условии отсутствия несанкционированного водоразбора непосредственно из системы отопления.

Основой рассуждений авторов рассматриваемой методики контроля работы теплосчетчика является зависимость приращений $M_{ГВС}$ от приращений M_1 в предположении, что $M_{ГВС}$ не зависит от M_2. Т. е. величина разности показаний

M_1 и M_2 определяется приращением M_1. В идеальных системах зависимость $M_{ГВС}$ от M_1 выглядит следующим образом:

$$M_{ГВС}(\Delta M_1) = 1,0000 \times \Delta M_1 + 0,0000 \quad (4)$$

С учетом погрешностей измерения $M_{ГВС}$ и M_1 выражение (4) записывается в виде:

$$M_{ГВС}(\Delta M_1) = (1,0000 \pm 0,0156) \times \Delta M_1 + 0,0000, \quad (5)$$

при значении пределов относительных допускаемых погрешностей для обоих каналов, равных 1%.

Автор рассматриваемой методики строит зависимость $M_{ГВС}$ от M_1, аппроксимирует полученную зависимость полиномом первой степени и проверяет отклонение значения наклона прямой от установленного в выражении (5) допуска. Если угол наклона превышает допустимое значение, то это, по мнению автора методики, свидетельствует о выходе из строя узла учета.

Другой подход, используемый автором, – искусственное приведение системы к закрытой с помощью выражения

$$M_2^1 = M_2 + M_{ГВС}, \quad (6)$$

и построение зависимости M_1 от M_2^1. Построенная зависимость также анализируется по критерию (5).

Рассмотрим данный подход подробнее. Пусть приращение величины Y зависит от приращения величины X в соответствии с выражением:

$$Y_i - Y_{i+1} = X_i - X_{i+1} + \Delta(X_i) - \Delta(X_{i+1}), \quad (7)$$

где $\Delta(X)$ - взаимное расхождение величин X и Y.

Угол наклона β_i в этом случае можно рассчитать по следующей зависимости:

$$\beta_i = \frac{X_i - X_{i+1} + \Delta(X_i) - \Delta(X_{i+1})}{X_i - X_{i+1}} = 1 + \frac{\Delta(X_i) - \Delta(X_{i+1})}{X_i - X_{i+1}}. \quad (8)$$

Если величина взаимного расхождения не зависит от X, то угол наклона всегда равен 1. В этом случае по предлагаемой методике совершенно невозможно оценить взаимное расхождение показаний. Если взаимное относительное расхождение величин постоянно, т.е. $\Delta(X_i) = \delta X_i$, то угол наклона напрямую характеризует величину взаимного расхождения, $\beta = 1 + \delta$. Если величина взаимного расхождения переменна, то угол наклона зависит от характера этой зависимости.

Предположим, что в точке X_i взаимное расхождение величин Y и X равно $\Delta(X_i) = 0,009X_i$, а в точке X_{i+1} - $\Delta(X_{i+1}) = -0,009X_{i+1}$. Тогда угол наклона зависит от ширины $\frac{X_{i+1}}{X_i}$ по выражению:

$$\beta_i = 1 + 0,009\frac{K+1}{K-1} \quad (9)$$

$$K = \frac{X_{i+1}}{X_i}$$

Зависимость угла наклона β_i от K приведена на рисунке 1.

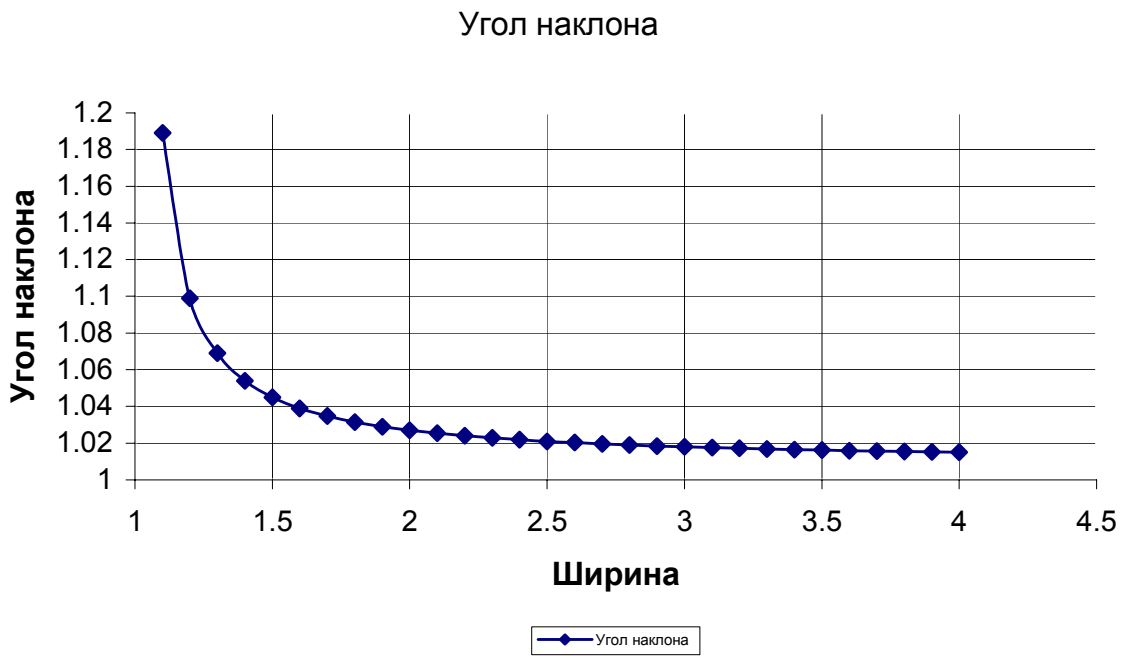

Рисунок 1

При малой ширине значение угла наклона достигает 1,18, при значении взаимного расхождения величин, не превышающем 0,9%. Таким образом, при знакопеременном характере зависимости взаимного расхождения величин Y и X угол наклона будет сильно отличаться от допускаемого.

При линейной аппроксимации, фактически, производится усреднение углов β_i. Поэтому результат – средний угол наклона – будет сильно зависеть от параметров аппроксимации: количества точек, ширины диапазона и т.д., и характера взаимного расхождения величин.

Для иллюстрации вышесказанного был проведен эксперимент с использованием проливной поверочной установки класса 0.15, в ходе которого была промоделирована система учета потребления тепловой энергии, соответствующая выражению (3). Схема эксперимента приведена на рисунке 2.

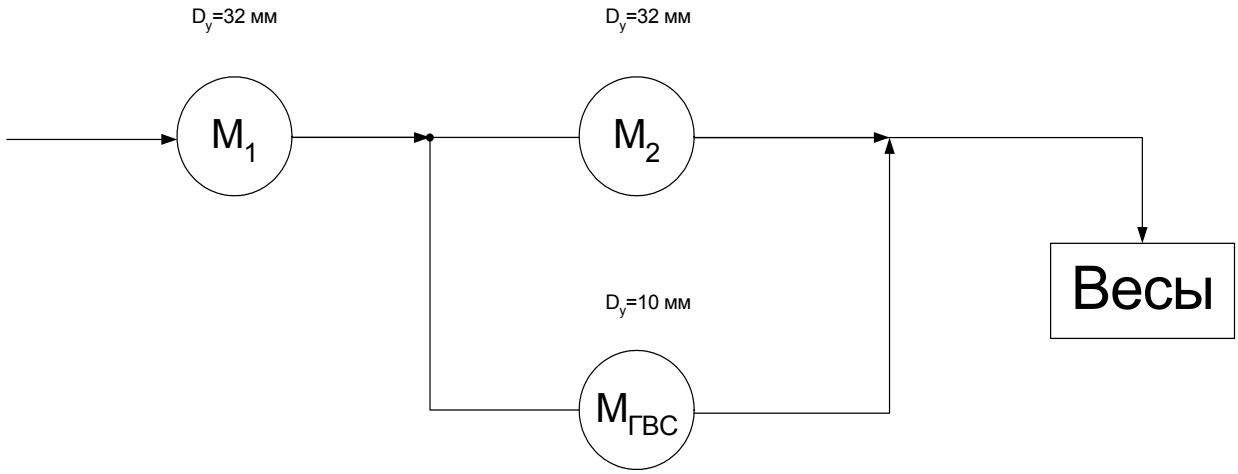

Рисунок 2

Два расходомера с диаметром условного прохода 32 мм имитируют измерения значения массового расхода в подающем (M_1) и обратном (M_2) трубопрово-

дах. Расходомер с диаметром условного прохода 10 мм имитирует измерения в трубопроводе ГВС ($М_{ГВС}$). Значение расхода через $М_{ГВС}$ изменялось от 0,09 т/ч до 2,8 т/ч. При этом значение расхода $М_1$ подбиралось таким образом, чтобы значение расхода $М_2$ было постоянным. Эксперимент проводился в течение 3-х дней. Результаты измерений приведены в таблице 1 и на рисунке 3.

Таблица 1

Значение расхода, т/ч			
$М_{ЭТ}$ (по весам)	$М_2$	$М_{ГВС}$	$М_1$
9.217	9.114	0.091	9.187
9.32	9.001	0.309	9.29
9.709	9.102	0.596	9.681
10.055	9.129	0.921	10.024
10.24	9.032	1.202	10.215
10.558	9.05	1.503	10.52
10.955	9.124	1.823	10.909
11.077	8.954	2.105	11.015
11.424	9.017	2.388	11.363
11.847	9.106	2.735	11.805
11.809	9.071	2.725	11.764
11.485	9.04	2.436	11.44
11.134	9.026	2.096	11.082
10.898	9.072	1.804	10.84
10.691	9.162	1.525	10.652
10.225	9.008	1.201	10.179
9.966	9.044	0.904	9.913
9.763	9.137	0.612	9.715
9.279	8.959	0.308	9.234
9.085	8.983	0.094	9.043

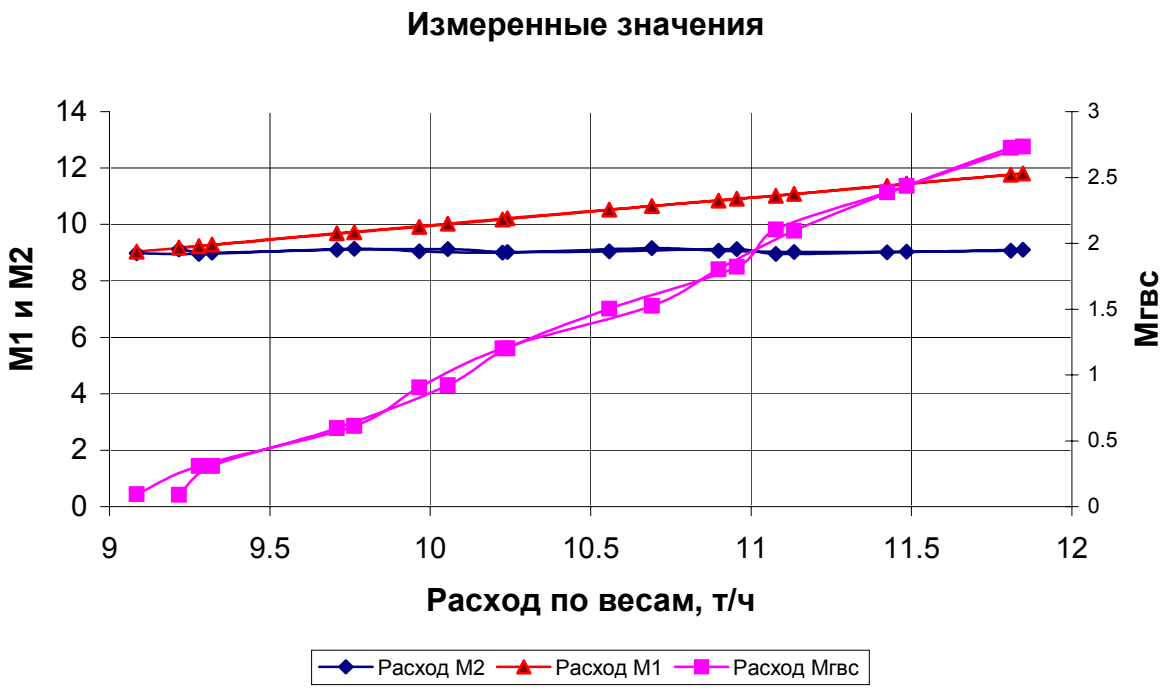

Рисунок 3

Построим зависимость $M_{ГВС}$ от (M_1-M_2) – рисунок 4.

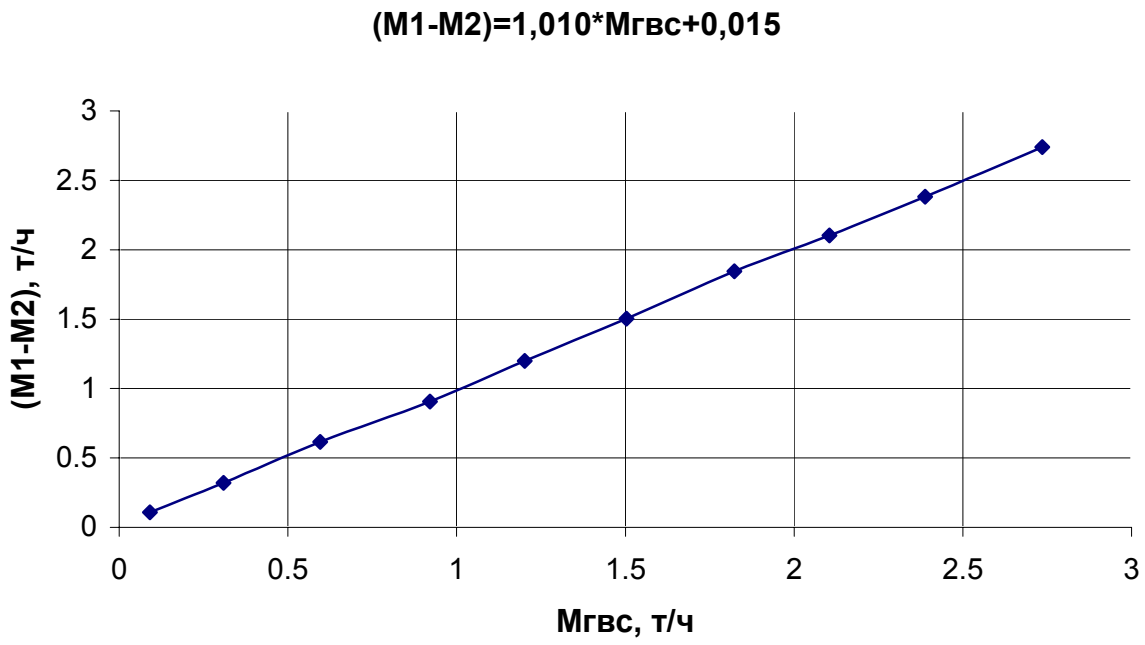

Рисунок 4

В результате аппроксимации каналы M_1 и $M_{ГВС}$ расходятся на 1,0%, что в пределах допуска, установленного автором рассматриваемой методики. Построим зависимость взаимного расхождения каналов M_1 и $M_{ГВС}$ – рисунок 5.

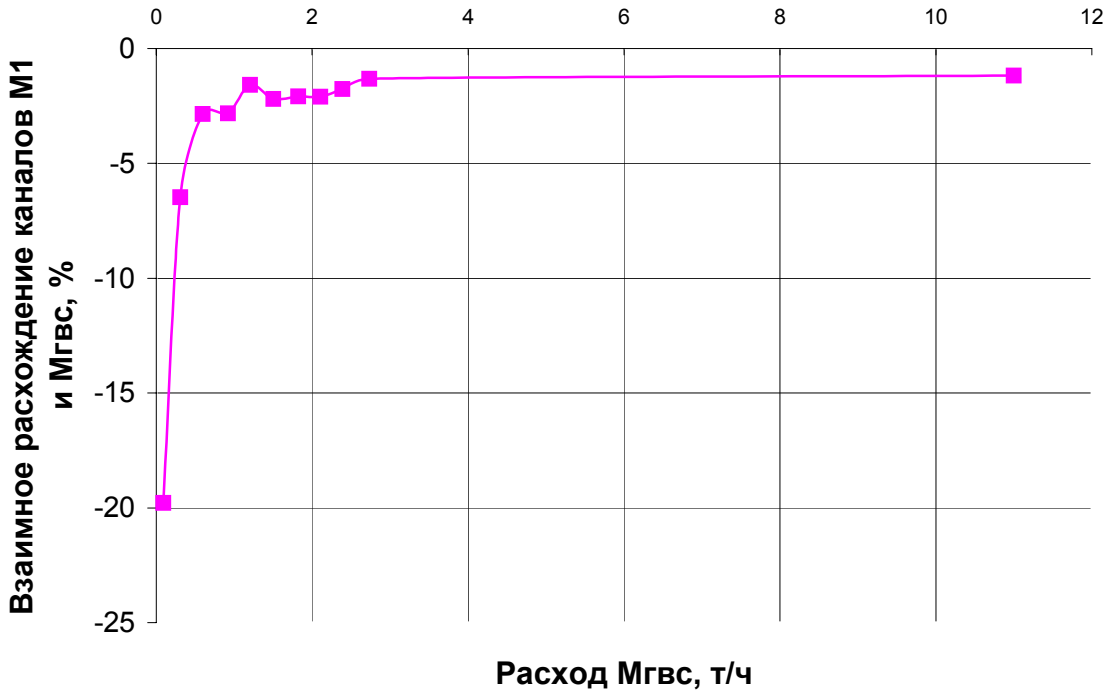

Рисунок 5

Из рисунка 5 видно, что оценка, полученная при аппроксимации, значительно ниже реального значения расхождения каналов (до 20%). С другой стороны, расходомеры были также исследованы при M_2=0. Результаты исследований показывают, что каналы M_1 и $M_{ГВС}$ расходятся не более чем 0,5%. Такое расхождение объясняется методической ошибкой, допускаемой при аппроксимации полиномом первого порядка, и методической ошибкой, связанной с заменой прямых измерений на косвенные.

Построим зависимость значений угла наклона от МГВС в соответствии с выражением (8) – рисунок 6.

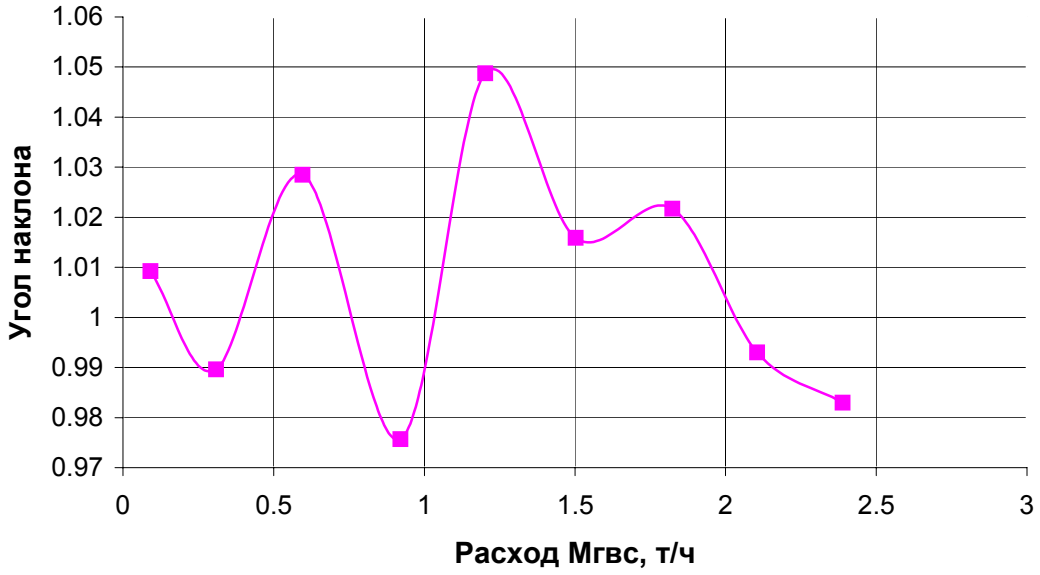

Рисунок 6

В среднем, угол наклона составляет 1,01, что соответствует результату аппроксимации, но на отдельных участках угол наклона достигает значения 1,05. Таким образом, из-за характера взаимного расхождения каналов измерения, при аппроксимации получен результат, превышающий результаты исследований приборов прямым методом почти в 2 раза.

Аналогична ситуация при искусственном закрытии системы по выражению (6) . Построим зависимость M_1 от M_2 в закрытой системе – рисунки 7, 8.

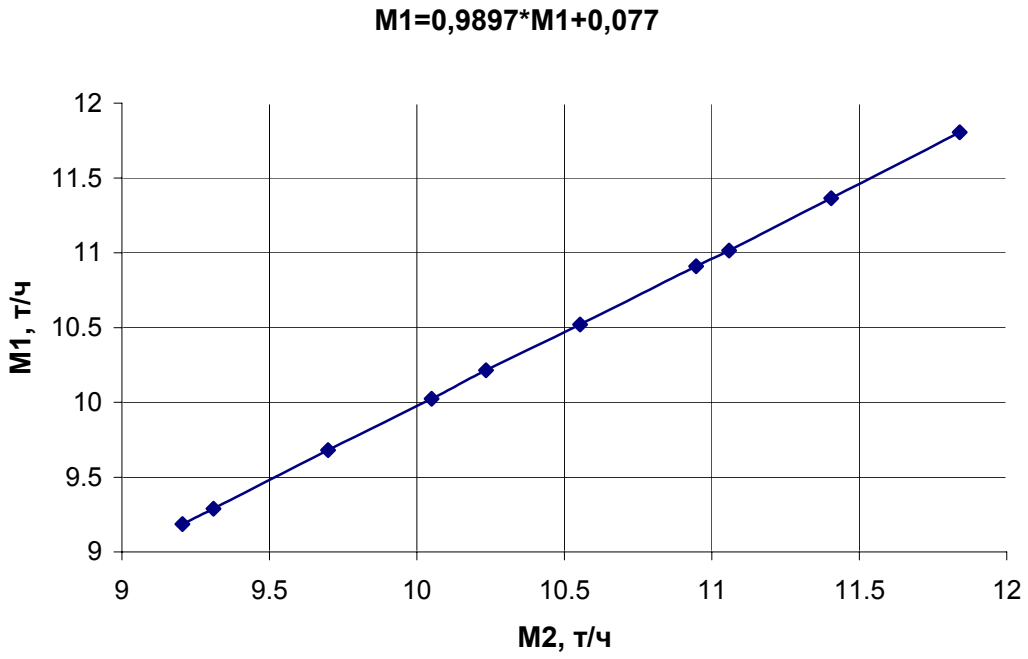

Рисунок 7

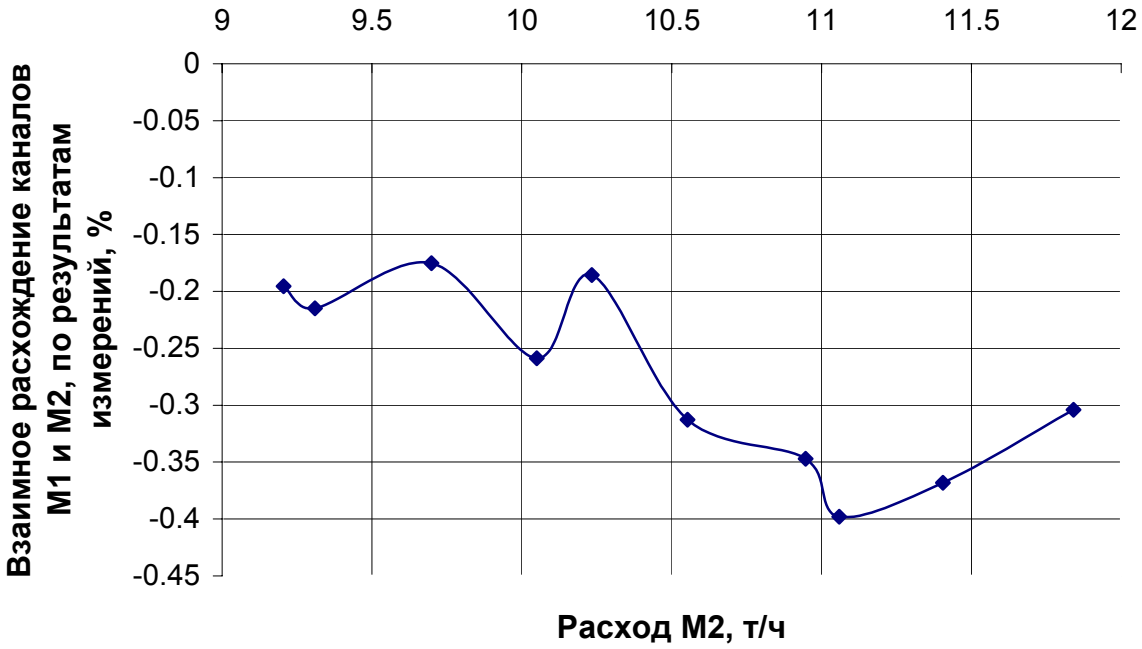

Рисунок 8

В результате аппроксимации взаимное расхождение каналов M_1 и M_2 – 1,1%, т.е. завышено почти в 3 раза.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1) предлагаемая методика оценки взаимного расхождения показаний каналов измерения расходов в открытой системе имеет крайне ограниченную применимость, обусловленную неизвестным видом характеристики.
2) предлагаемая методика может дать хороший результат только при постоянном относительном расхождении каналов.
3) результат аппроксимации может сильно отличаться от реального значения расхождения каналов в большую сторону.

Сведения об авторах:
Сафин А. Г. – ведущий научный сотрудник ФГУП ВНИИР
Кузовков В. М. – главный метролог ЗАО «Взлет»