

**О.А. Цыбульский**

## ПРИМЕНЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СОПЕЛ В УЗЛАХ УЧЕТА ГАЗА

### Аннотация

Точность, диапазон измерения существующих узлов учета газа могут быть значительно улучшены при применении предложенной параллельной структуры узла учета с использованием критических сопел. Рассмотрены вопросы реализации узлов учета газа с критическими соплами в пункте учета и редуцирования газа.

**Ключевые слова:** измерение, расход газа, критическое сопло, точность, диапазон, пункт учета и редуцирования, узел учета газа.

### Введение

Важным условием, определяющим качество измерительного прибора, является точность применяемой меры. При измерении расхода газа в эталонных установках в качестве меры часто применяется критическое сопло. Как отмечено сотрудниками ВНИИ расходомерии в статье [1]: «Основными преимуществами установок на критических соплах являются высокая точность, простота конструкции и, следовательно, невысокая стоимость, возможности длительных испытаний и измерений расхода в широком диапазоне, высокая метрологическая надежность, так как основной элемент (сопло) не имеет движущихся частей и острых кромок, т. е. не изнашивается, отсутствие регулировок и настроек, удобство обслуживания.»

Для измерения расхода газа в узлах учета потребителя критические сопла применяются гораздо реже. Методам измерений расхода при помощи критических сопел посвящены работы [2], [3]. Характерными особенностями устройств, рассмотренных в этих работах, являются размещение критического сопла в трубопроводе последовательно с регулятором давления и непрерывный режим работы сопла. При этом достигается повышение точности измерения, но в узком диапазоне измерения.

Для получения широкого диапазона измерения преобразователя расхода, применяющего критическое сопло, предложен метод импульсно-

го преобразования расхода [4]-[6]. Принцип действия импульсного преобразования расхода основан на применении критического сопла (далее – сопло) в дискретном режиме работы. Дискретный режим задается магнито-механическим клапаном, установленным на выходе из сопла и открывающим его при определенном падении давления газа после клапана. Клапан функционирует за счет энергии коммутируемого потока. За соплом установлена буферная камера, за ней регулятор давления, поддерживающий постоянное давление после себя. По мере потребления газа и соответствующего падения давления в буферной камере клапан дискретно открывает сопло и квантами фиксированного объема восстанавливает давление в буферной камере. Расходомер предназначен для установки на высоком давлении до регулятора давления и использует для работы часть перепада давления на регуляторе. Расход газа через регулятор давления непрерывен. Расходомер-счетчик «Прамер-210Ех» (АО «ПромСервис», РФ), основанный на дискретной работе критического сопла, внесен в Госреестр средств измерений.

Как известно, современные расходомеры для определения прошедшего через них объема газа, приведенного к стандартным условиям, осуществляют измерение следующих параметров: текущего расхода (объемного или массового), температуры, давления газа и интервала времени измерения [7]. Из перечисленных параметров наименее точно и с наибольшими затратами

измеряется текущий расход. Применение в расходомере критических сопел позволяет вместо измерения переменного расхода газа измерять переменный интервал времени, в течение которого сопло включено, что значительно точнее, проще и менее затратно.

Переход в дискретный режим работы позволяет расширить диапазон измерения расхода, сохранив преимущества применения критического сопла в качестве меры. Но он имеет и свои недостатки. При высокой частоте прерывания потока недостаточно быстродействия регулятора давления, а при низкой частоте прерывания потока недостаточно объема буферной камеры.

Для исключения отмеченных недостатков предложена усовершенствованная схема подключения сопел [8], [9]. Это решение сформировалось в результате опыта разработки и испытаний импульсного преобразователя расхода «Прамер-210» [4]-[6]. Принцип действия усовершенствованного решения пояснен на основе упрощенной схемы (рис. 1).

### Принцип действия усовершенствованного узла учета

Узел учета состоит из двух параллельных ветвей учета: стандартной, включающей в себя преобразователь расхода (далее – расходомер) и регулятор давления (далее – регулятор), и ветви с критическим соплом и клапаном. Критическое сопло осуществляет измерение массового расхода как природного, так и технических газов и выполнено в соответствии с ГОСТ Р 8.972–2019 «Расход и количество газа. Методика измерений при помощи критических сопел», а также с международным стандартом ISO 9300:2005 «Measurement of gas flow Venturi nozzles».

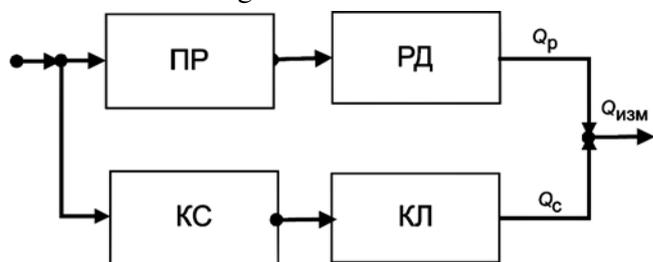


Рис. 1. Упрощенная структурная схема предлагаемого узла учета газа: ПР – преобразователь расхода; РД – регулятор давления; КС – критическое сопло; КЛ – клапан

Узел учета обеспечивает необходимый режим истечения газа в критическом сопле при любом рабочем давлении газопровода (высоком, сред-

нем), поскольку необходимый перепад давления обеспечивается регулятором давления.

Как известно, критические сопла являются одним из самых стабильных устройств, применяемых для задания расхода в газовых эталонных стендах [1], [3]. Важным свойством критических сопел является независимость потока газа от изменения давления на выходе сопла, т. е.  $\Delta P / \Delta Q \rightarrow \infty$ . Критическое сопло является источником стабильного потока. Поэтому расход через критическое сопло независим от падения давления на открытом клапане (рис. 1), расположенном по потоку ниже сопла.

Регулятор, наоборот, стабилизирует давление у потребителя, изменяя расход через себя, т. е.  $\Delta P / \Delta Q \rightarrow 0$ . Он является источником стабильного давления. В результате параллельного соединения источника стабильного потока с источником стабильного давления получим, что любое изменение расхода потребителя приведет к изменению расхода только у регулятора и расходомера, оставляя неизменным расход через сопло.

Таким образом, измерение расхода в каждой из параллельных ветвей осуществляется своим измерительным устройством, но с разной точностью. В части потока, измеряемой критическим соплом, обеспечивается высокая точность измерения расхода. Результирующая относительная погрешность измерения в итоге снижается.

Поскольку критическое сопло измеряет массовый расход газа, для его применения совместно с измерительным преобразователем объемного расхода необходимо перевести массовый расход сопла в объемный расход. В дальнейшем полагаем измерение расхода объемным.

В качестве измерительного преобразователя расхода может быть применен расходомер любого типа, имеющий выходной сигнал, пропорциональный текущему расходу газа.

Узел учета работает следующим образом. При расходах меньших, чем верхняя граница диапазона измерения расходомера  $Q \leq Q_g$ , клапан закрыт и расход газа измеряется с предельной относительной погрешностью расходомера  $\delta Q_p$ .

При превышении верхней границы диапазона измерения расходомера  $Q > Q_g$  клапан открывается. Это добавляет в трубопровод потребителя дополнительный поток от критического сопла, которое измеряет расход газа с предельной относительной погрешностью  $\delta Q_c$ . Давление в трубопроводе после сопла должно возрасти, но это-

му противодействует регулятор давления и уменьшает поток газа через себя и через расходомер. В результате давление и расход у потребителя не изменятся, а поток через расходомер уменьшится на величину расхода критического сопла, т. е. почти до нижней границы его диапазона измерения, и дальше снова будет увеличиваться по мере роста расхода потребителя.

Чтобы клапан вблизи границы коммутации не переключался часто, вводят гистерезис, задавая расход критического сопла меньше диапазона измерения расходомера:

$$(Q_{pv} - Q_{pn}) > Q_c, \quad (1)$$

где  $Q_c$  – расход критического сопла в рабочих условиях;  $Q_{pn}$ ,  $Q_{pv}$  – нижняя и верхняя границы диапазона измерения преобразователя расхода в рабочих условиях.

Соответственно переход нижней границы диапазона измерения вызывает отключение критического сопла. При отключении сопла увеличение потока через расходомер также не должно превышать величины диапазона измерения расходомера (1).

### Результат измерения

Измеренный расход потребителя  $Q_{изм}$  равен сумме потоков измерительных преобразователей: потока через расходомер  $Q_p$  и потока через критическое сопло  $Q_c$ :

$$Q_{изм} = Q_p + Q_c.$$

Результирующая предельная абсолютная погрешность измерения параллельных измерительных каналов рассчитывается как алгебраическая сумма модулей предельных абсолютных погрешностей расходомера  $\Delta Q_p$  и критического сопла  $\Delta Q_c$ :

$$\Delta Q_{изм} = |\Delta Q_p| + |\Delta Q_c| = Q_p |\delta Q_p| + Q_c |\delta Q_c|.$$

Соответственно результирующая предельная относительная погрешность измерения расхода равна

$$\delta Q_{изм} = \frac{Q_p |\delta Q_p| + Q_c |\delta Q_c|}{Q_p + Q_c}. \quad (2)$$

Поскольку  $|\delta Q_c| < |\delta Q_p|$ , результирующая предельная относительная погрешность измерения будет меньше погрешности расходомера  $\delta Q_{изм} < |\delta Q_p|$ .

**Пример.** Полагаем, что верхняя ветвь состоит из типового узла учета с диапазоном измерения в рабочих условиях от 5 до 100 м<sup>3</sup>/ч (1:20) с предельной относительной погрешностью измерения 1,2 %, постоянной в диапазоне измерения.

Для ветви с критическим соплом расход, приведенный к стандартным условиям, и его погрешность определяются в результате калибровки сопла на эталонном стенде. После калибровки относительная погрешность измерения расхода критическим соплом обычно составляет  $\delta Q_c = 0,25$  %. В рабочих условиях эксплуатации узла учета предельная относительная погрешность измерения расхода критическим соплом лежит в интервале 0,3...0,4 %. Берем для расчетов верхнее значение  $\delta Q_c = 0,4$  %. С учетом требования (1) зададим расход через критическое сопло  $Q_c = 80$  м<sup>3</sup>/ч с предельной относительной погрешностью 0,4 %.

Посредством формулы (2) рассчитаем изменение по диапазону предельной относительной погрешности измерения данного узла учета. Результат приведен в табл. 1 и рис. 2, из которых видно, как полоса предельной погрешности узла учета газа меняет форму и значение после коммутации критического сопла.

Таблица 1

#### Изменение предельной относительной погрешности узла учета при подключении параллельной ветви с критическим соплом

| Поддиапазон | $Q_{p,}$<br>м <sup>3</sup> /ч | $Q_{c,}$<br>м <sup>3</sup> /ч | Расход,<br>м <sup>3</sup> /ч | Относительная погрешность узла учета, % |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|
| 0           | 5                             | 0                             | 5                            | 1,2                                     |
| 0           | 10                            | 0                             | 10                           | 1,2                                     |
| 0           | 50                            | 0                             | 50                           | 1,2                                     |
| 0           | 100                           | 0                             | 100                          | 1,2                                     |
| 1           | 20                            | 80                            | 100                          | 0,6                                     |
| 1           | 30                            | 80                            | 110                          | 0,6                                     |
| 1           | 50                            | 80                            | 130                          | 0,7                                     |
| 1           | 100                           | 80                            | 180                          | 0,8                                     |

При задании граничных значений расходов включения/выключения клапана вводится гистерезис, исключающий частое переключение сопел при небольших колебаниях расхода у границы переключения и соответственно уменьшающий долю времени действия динамической погрешности в общем времени измерения объема.

Например, подключение сопла происходит в момент, когда расход через расходомер достига-

ет 100 м<sup>3</sup>/ч, а расход через сопло – 80 м<sup>3</sup>/ч. Тогда, после подключения сопла, расход через расходомер станет равным 20 м<sup>3</sup>/ч. Если с этого момента расход потребителя начнет уменьшаться, то для того чтобы сопло отключилось, расход потребителя должен уменьшиться на 15 м<sup>3</sup>/ч до нижней границы переключения 5 м<sup>3</sup>/ч. Гистерезис расхода в 15 м<sup>3</sup>/ч исключает случайное переключение сопла в граничном состоянии переключения. Необходимое значение гистерезиса по расходу задается динамикой изменения расхода потребителем. Чем больше максимальный расход узла учета и больше динамика потребления газа, тем больший необходим гистерезис по расходу, и наоборот.

В известных устройствах многодиапазонных узлов учета газа [10]-[12] также применяется гистерезис для обеспечения устойчивости функционирования при переключении диапазонов.

Схема с подключаемым критическим соплом может быть полезна при модернизации узла учета с целью расширения диапазона или для получения различных границ летнего и зимнего пределов измерения.

Описанный метод (принцип) проверен экспериментально на расходомере газа «Прамер-210Ех» и защищен патентом РФ [8] и международной заявкой [9].

### Многодиапазонный узел учета газа

Для автоматического управления клапаном необходимо устройство управления, определяющее моменты коммутации сопла. Но если имеется устройство управления, то целесообразно управлять коммутацией не одной ветви с критическим соплом, а несколькими. Такая структура позволяет путем параллельного соединения набора критических сопел сформировать дискретную прецизионную шкалу опорных расходов, а так-

же достигнуть больших значений расходов и широкого диапазона измерений путем наращивания количества сопел, каждое из которых имеет небольшой расход. При увеличении количества ветвей с критическими соплами получим многодиапазонный узел учета газа [8], [9] со структурной схемой, представленной на рис. 3.

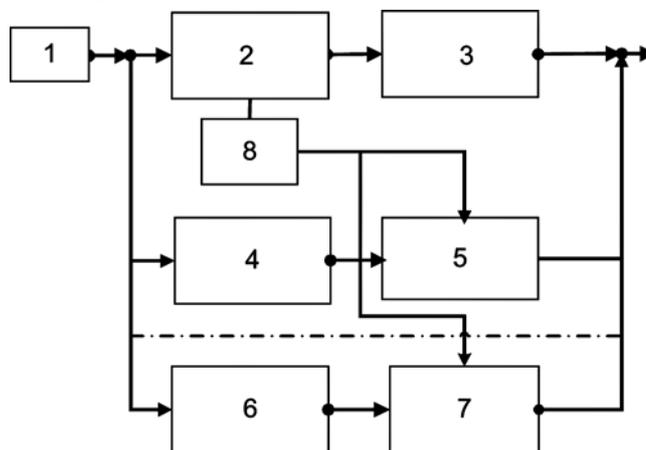


Рис. 3. Структурная схема многодиапазонного узла учета газа: 1 – основная линия подачи газа; 2 – расходомер; 3 – регулятор давления; 4 – критическое сопло 1; 5 – клапан 1; 6 – критическое сопло *i*; 7 – клапан *i*; 8 – блок управления клапанами

Применив *i* параллельных сопел с расходами  $Q_{ci}$ , получим расширение диапазона измерения от  $Q_{pн}$  до  $Q_{pв} + \sum_i Q_{ci}$ , применяя при этом расходомер и регулятор давления с малой пропускной способностью и узким диапазоном.

Измеряемый текущий расход равен сумме расхода расходомера  $Q_p$  и расходов подключенных параллельно критических сопел. Современные корректоры в узлах учета газа легко и точно суммируют расходы газа по нескольким каналам поступления информации:

$$Q_{изм} = \sum_i Q_{ci} + Q_p.$$

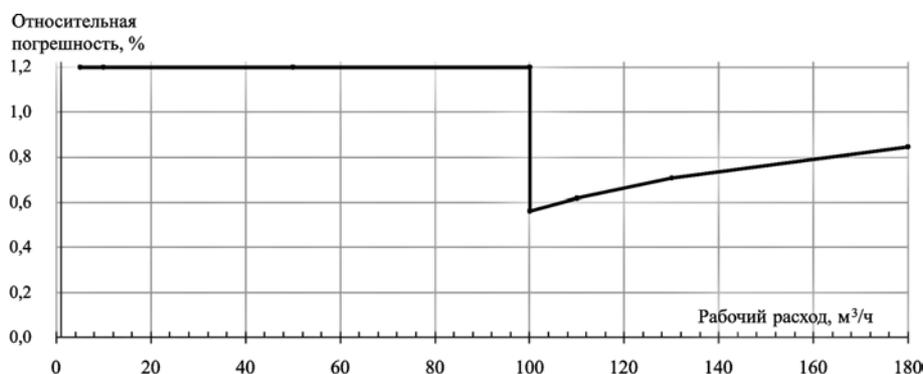


Рис. 2. Изменение предельной относительной погрешности узла учета при подключении параллельной ветви с критическим соплом

Поскольку узел учета состоит из параллельного соединения устройств с нормированной предельной погрешностью, верхнюю оценку предельной относительной погрешности всего узла учета получим, суммируя по модулю абсолютные предельные погрешности этих устройств. Предельная относительная погрешность измерения узла учета при условии, что критические сопла имеют после калибровки равные предельные относительные погрешности  $\delta Q_{ci} = \delta Q_c$ , определится из выражения

$$\delta Q_{изм} = \frac{\sum_i Q_{ci} |\delta Q_{ci}| + Q_p |\delta Q_p|}{\sum_i Q_{ci} + Q_p}, \quad (3)$$

где  $\delta Q_p, \delta Q_c$  – предельные относительные погрешности соответственно расходомера и критических сопел;  $Q_p, \sum_i Q_{ci}$  – расход при рабочих условиях соответственно расходомера и суммарный расход подключенных критических сопел.

Таким образом, чем большая часть измеряемого потока проходит через сопла, тем меньше результирующая предельная относительная погрешность узла учета.

Для минимизации количества необходимых сопел расходы (веса) сопел задаются, например, в соответствии с выражением  $Q_{ci} = Q_c 2^{(i-1)}$ , где  $i = 1, 2, \dots, n$ .

В качестве примера рассчитаем при помощи уравнения (3) предельную относительную погрешность узла учета с применением трех параллельных ветвей со значениями рабочего расхода критических сопел  $Q_{c1} = 80 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_{c2} = 160 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_{c3} = 320 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Предельные относительные погрешности критических сопел  $\delta Q_{c1} = \delta Q_c = 0,4 \%$ . Предельная относительная погрешность расходомера  $\delta Q_p = 1,2 \%$  в диапазоне рабочих расходов G65 от  $Q_{pn} = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $Q_{pv} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$  (1:20).

По мере увеличения расхода потребителем переключение поддиапазонов осуществляется последовательно (табл. 2). Изменение расхода через расходомер при единовременной коммутации критических сопел не может быть больше диапазона измерения расходомера (1).

Таблица 2

**Зависимость изменения по диапазону предельной относительной погрешности измерения рабочего расхода 8-диапазонным узлом учета газа**

| Поддиапазон | Рабочий расход преобразователя расхода $Q_p, \text{ м}^3/\text{ч}$ | Рабочий расход критических сопел $\sum Q_{ci}, \text{ м}^3/\text{ч}$ | Суммарный измеряемый расход $Q_{изм}, \text{ м}^3/\text{ч}$ | Предельная относительная погрешность измерения, % |
|-------------|--|--|---|---|
| 0           | 5  | 0  | 5   | 1,20  |
| 0           | 20   | 0  | 20  | 1,20  |
| 0           | 100  | 0  | 100   | 1,20  |
| 1           | 20   | 80   | 100   | 0,56  |
| 1           | 100  | 80   | 180   | 0,84  |
| 2           | 20   | 160  | 180   | 0,49  |
| 2           | 100  | 160  | 260   | 0,71  |
| 3           | 20   | 240  | 260   | 0,46  |
| 3           | 100  | 240  | 340   | 0,64  |
| 4           | 20   | 320  | 340   | 0,45  |
| 4           | 100  | 320  | 420   | 0,59  |
| 5           | 20   | 400  | 420   | 0,44  |
| 5           | 100  | 400  | 500   | 0,56  |
| 6           | 20   | 480  | 500   | 0,43  |
| 6           | 100  | 480  | 580   | 0,54  |
| 7           | 20   | 560  | 580   | 0,43  |
| 7           | 100  | 560  | 660   | 0,52  |

На рис. 4 представлена соответствующая табл. 2 характеристика предельной относительной погрешности измерения рабочего расхода 8-диапазонного узла учета газа, из которой наглядно видно, как снижается предельная относительная

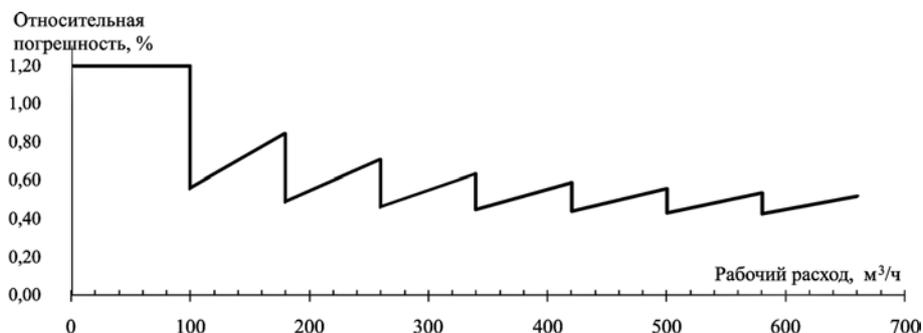


Рис. 4. Изменение предельной относительной погрешности измерения рабочего расхода газа 8-диапазонным узлом учета расхода газа

погрешность измерения по мере подключения критических сопел.

Изменение предельной относительной погрешности вдоль каждого поддиапазона имеет нелинейную форму, поэтому нормировать полосу предельной погрешности в каждом поддиапазоне целесообразно при помощи постоянного значения относительной погрешности, равного максимальному значению погрешности в этом поддиапазоне.

В приведенном примере на базе типового узла учета с расходомером G65 и регулятором давления предлагаемый узел учета при помощи трех критических сопел формирует прецизионную шкалу измерений из семи реперных точек расхода, задаваемых комбинациями подключенных критических сопел. Это позволяет:

- в 6,6 раз увеличить диапазон измерения (1:132 вместо 1:20);
- увеличить верхнюю границу диапазона измерения при рабочих условиях со 100 до 660 м<sup>3</sup>/ч;
- одновременно снизить предельную относительную погрешность в верхней границе диапазона измерения с 1,2 до 0,52 %.

### Коррекция погрешности измерения

Прецизионная шкала реперных точек расхода может быть применена для коррекции мультипликативной составляющей погрешности расходомера при условии постоянства расхода потребителя до и после коммутации сопел. Коррекция мультипликативной составляющей может проводиться как на эталонном стенде, так и в рабочих условиях, но с меньшей эффективностью. При помощи соотношения (4) рассчитывается корректирующий коэффициент, на который необходимо умножить коэффициент преобразования расходомера:

$$K_{i\text{корр}} = \frac{Q_{ci} - Q_{c(i-1)}}{Q_{изм\ в} - Q_{изм\ н}}, \quad (4)$$

где  $Q_{ci} - Q_{c(i-1)}$  – изменение расхода через критические сопла при переходе от  $(i - 1)$  поддиапазона к  $i$ -му поддиапазону;  $Q_{изм\ в} - Q_{изм\ н}$  – изменение расхода через расходомер при переходе от  $(i - 1)$  поддиапазона к  $i$ -му поддиапазону.

Поскольку режим работы расходомера не зависит от поддиапазона измерения, то и скорректированное значение коэффициента преобразования, полученное на каком-либо из поддиапазонов, справедливо и для других поддиапазонов.

### Пункт учета и редуцирования

В настоящее время узлы учета и регуляторы давления часто объединяют в пункты учета расхода газа и редуцирования (рис. 5).

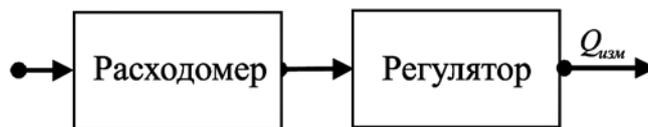


Рис. 5. Структурная схема типового пункта учета и редуцирования

В отличие от типового пункта учета и редуцирования (рис. 5), в котором узел учета газа и регулятор давления объединены пространственно, но функционируют независимо друг от друга, в предлагаемом пункте узел учета и регулятор объединены не только пространственно, но и функционально. Такой пункт учета и редуцирования является, по сути, единым функциональным блоком измерения и редуцирования (БИР), выполняющим одновременно функции измерения расхода газа, редуцирования и регулирования давления (рис. 6) [8], [9]. БИР обеспечивает совокупный эффект, превышающий возможности отдельного применения расходомера и регулятора.

Критические сопла давно применяются в современных эталонных газовых установках, но до сих пор не применяются для учета газа потребителя. Несмотря на высокую точность, надежность и простоту в эксплуатации, они измеряют расход только в узком диапазоне. Применить критические сопла для измерения расхода газа в широком диапазоне позволяет переход к дискретному режиму работы сопла. Этот режим возможно реализовать в составе БИР при совместной работе с регулятором давления.

В структурной схеме (рис. 6) БИР состоит из двух параллельных ветвей учета: стандартной, включающей в себя преобразователь расхода и регулятор давления, рассчитанные на малый расход газа, и блока критических сопел, включающего в себя одну или несколько ветвей критических сопел с клапанами. В качестве преобразователя расхода может быть применен расходомер любого типа, имеющий выходной сигнал, пропорциональный текущему расходу газа (переменного перепада давления, турбинный, ротационный, вихревой, струйный, термоанемометрический, ультразвуковой и т. д.). При этом измеряемые расходы обеих ветвей должны быть

переведены в одинаковую форму учета – объемную или массовую.

### Вопросы реализации измерения с критическими соплами и требования к БИР

БИР устанавливается на границе трубопроводов с высоким, средним и низким давлениями. Разность давлений на границе трубопроводов задается регулятором давления, и ее вполне достаточно, чтобы поддерживать критический режим работы сопел.

В соответствии с нормативными материалами ГОСТ Р 8.972–2019 «Методика измерений при помощи критических сопел» и международного стандарта ISO 9300:2005 сформулируем условия, которые обеспечат надежный критический режим истечения газа через сопло:

- 1) критическое сопло должно быть изготовлено и установлено в трубопроводе в соответствии со стандартными требованиями ГОСТ Р 8.972–2019;
- 2) значение числа Рейнольдса в горловине сопла должно быть не менее чем  $2 \cdot 10^5$ ;
- 3) отношение абсолютного давления газа на входе сопла к абсолютному давлению газа на выходе сопла должно быть не менее чем 1,25.

Первые два условия должны быть выполнены при производстве сопла. Третье условие должно выполняться в рабочих условиях. При изменении расхода потребителя на выходе критического сопла изменяется давление, определяемое неравномерностью регулирования давления регулятором. Неравномерность регулирования составляет величину не более  $\pm 10\%$ . То есть при снижении расхода потребителя и одновременном уве-

личении давления на входе сопла давление на выходе сопла может увеличиться не более чем в 1,1 раз. Чтобы при этом режим истечения газа из сопла оставался критическим, условие 3 должно быть скорректировано и иметь значение не менее чем  $1,25 \cdot 1,1 = 1,375$ .

При выполнении условий 1, 2 и скорректированного условия 3 сопло всегда будет находиться в критическом режиме истечения и с заданной точностью поддерживать расход газа через себя, независимо от изменения давления на его выходе.

### Диапазон изменения рабочего давления в трубопроводе

Поскольку БИР устанавливается на границе трубопроводов с высоким, средним и низким давлениями, разность давлений между трубопроводами падает на расходомере и регуляторе давления, а также на параллельном к ним блоке критических сопел с клапанами.

Значения абсолютного давления в трубопроводах разных категорий составляют:

- в трубопроводе высокого давления 1-й категории – 1,3 МПа;
- в трубопроводе высокого давления 2-й категории – 0,7 МПа;
- в трубопроводе среднего давления – 0,4 МПа;
- в трубопроводе низкого давления – 0,105 МПа.

Следовательно, при переходе от трубопровода высокого давления 1-й категории к трубопроводу высокого давления 2-й категории критический режим сохранится в диапазоне изменения входного давления от 1,3 до  $1,375 \cdot 0,7 = 0,963$  МПа.

При переходе от трубопровода высокого давления 2-й категории к трубопроводу среднего

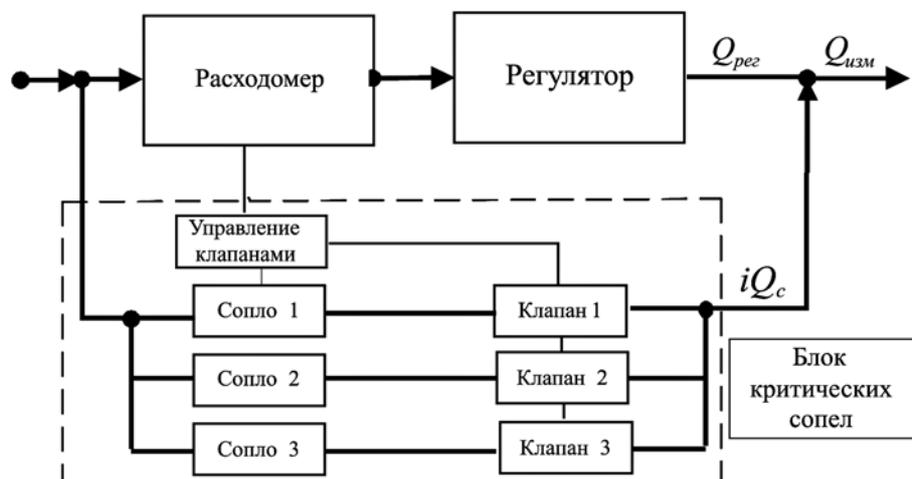


Рис. 6. Структурная схема предлагаемого пункта учета и редуцирования (БИР)

давления критический режим сохранится в диапазоне изменения давления от 0,7 до  $1,375 \cdot 0,4 = 0,55$  МПа.

При переходе от среднего давления к низкому диапазон изменения давления может быть еще больше и будет определяться не условием критического истечения, а минимальным перепадом давления на регуляторе от 0,4 до 0,16 МПа.

Таким образом, для всех возможных соотношений давлений в трубопроводах будет сохраняться критический режим истечения газа через сопло.

При этом необходимо отметить, что на расходомере, соединенном последовательно с регулятором давления, падает существенно меньшая часть общего перепада давления. Например, согласно проведенному в [13] сравнению, на всех типах расходомеров газа, за исключением расходомеров на сужающем устройстве и струйном, падение давления при номинальном расходе не превышает 1,2 кПа, что пренебрежимо по сравнению с перепадом давления на регуляторе, изменяющемся в диапазоне от 150 до 300 кПа и более. Следовательно, поток газа через расходомер задается и поддерживается регулятором в процессе стабилизации выходного давления.

### Устойчивость многодиапазонных БИР

Сформулируем для БИР граничные условия, выполнение которых обеспечит устойчивость его работы.

1. Регулятор давления прямого действия должен иметь при импульсном изменении расхода апериодический переходный процесс и быть устойчивым во всем диапазоне измерения расходомера.
2. Поскольку расход через критическое сопло не зависит от давления на его выходе, коммутация  $i$ -го критического сопла не изменит расход у других подключенных сопел. Поэтому параллельное соединение  $n$  критических сопел на *рис. 6* должно быть эквивалентно одному критическому соплу с расходом  $\sum_i^n Q_i$ .
3. Единовременное изменение расхода через блок критических сопел после коммутации должно быть меньше диапазона измерения расходомера [выражение (1)].
4. Для того чтобы регулятор успевал демпфировать переходный процесс, вызванный коммутацией критического сопла, время нарастания переходного процесса коммутации должно

быть больше или равно соответствующему времени нарастания переходного процесса применяемого регулятора.

При выполнении условий 1 и 2 БИР в динамическом режиме можно рассматривать как параллельное соединение двух апериодических звеньев (звена регулятора и звена критического сопла) к общей нагрузке через емкость трубопровода. Причем звено, соответствующее блоку критических сопел, не является цепью обратной связи для регулятора, поскольку сигнал не передается с выхода на вход критических сопел. Следовательно, устойчивость регулятора не должна нарушаться при параллельном подключении блока критических сопел. Это подтверждается экспериментально.

Чтобы не допустить автоколебаний при переключении сопел, должны выполняться пп. 3 и 4. Изменение расхода при коммутации сопел должно быть ориентировочно в 1,2...1,3 раза меньше диапазона измерения расходомера. А быстрое действие регулятора прямого действия должно быть достаточно для демпфирования переходного процесса коммутации.

Поскольку устойчивость может зависеть от особенностей монтажа и режима работы на объекте, увеличить устойчивость, помимо настройки регулятора, можно:

- увеличивая значение величины гистерезиса расхода в зависимости от динамики нагрузки;
- увеличивая значение буферного объема трубопровода после регулятора;
- увеличивая интервал времени коммутации клапанами критических сопел.

Согласно ГОСТ Р 54960–2012 «Системы газораспределительные. Пункты газорегуляторные блочные. Пункты редуцирования газа шкафные. Общие технические требования», в качестве защитной арматуры допускается применять отключающий клапан с электромагнитным приводом со временем срабатывания не более 1 с. Это не вызывает нарушений в работе расходомеров. Соответственно не будет нарушений при таком же времени включения клапана критического сопла и снижения расхода через расходомер. При нарастании расхода через расходомер динамическая нагрузка на него будет такая же, что и при уменьшении.

Как уже отмечалось (п. 4), время нарастания переходного процесса коммутации должно быть больше или равно соответствующему времени

нарастания переходного процесса применяемого регулятора. Для регуляторов прямого действия этому требованию соответствуют электромагнитные клапаны Ду25-Ду50 с демпфером и без него, со временем коммутации 1...3 с. Практически время коммутации может быть меньше; например, в импульсном преобразователе расхода газа [14] магнито-механический клапан импульсно, квантами фиксированного объема восполняет в буферной камере объем газа, ушедший к потребителю. Длительность нарастания переходного процесса менее 0,5 с. При этом на максимальном расходе узла учета пульсации давления на выходе демпфируются регулятором прямого действия с динамическим отклонением выходного давления не более 2 %. При уменьшении измеряемого расхода увеличивается период включения сопла и пульсации выходного давления снижаются до десятых долей процента. Именно поэтому эффективна структура узла учета с параллельными критическими соплами, которая позволяет увеличить интервал времени между коммутациями потока в сотни раз и соответственно позволяет снизить пульсации давления на выходе регулятора и снизить требования к его быстродействию. При подключении ветви с критическим соплом параллельно расходомеру и регулятору не наблюдалось неустойчивости выходного давления регулятора. Переходный процесс проходил так же, как и при скачкообразном изменении расхода потребителя.

### Оценка технического уровня БИР

Оценим преимущества, получаемые при применении блока критических сопел в БИР по сравнению, например, с типовым комплексом учета газа G65 с динамическим диапазоном измерения 1:100, предельной относительной погрешностью 2,2 % в диапазоне от 1 до 5 м<sup>3</sup>/ч и предельной относительной погрешностью 1,2 % в диапазоне от 5 до 100 м<sup>3</sup>/ч. Этот же комплекс в составе БИР с блоком из трех критических сопел, имеющих предельную относительную погрешность измерения  $\delta X_c = 0,4 \%$ , обеспечивает диапазон измерений в рабочих условиях от 1 до 660 м<sup>3</sup>/ч (1:660) с предельной относительной погрешностью, изменяющейся от 2,2 % в нижней границе диапазона до 0,52 % в верхней границе диапазона измерения. Значения полосы предельной относительной погрешности приведены в *табл. 3* и на *рис. 7*. Чтобы не учитывать нелинейное изменение предельной

относительной погрешности БИР внутри поддиапазонов, предельная относительная погрешность нормирована постоянными значениями погрешности в каждом поддиапазоне. Постоянные значения равны максимальному значению относительной погрешности в поддиапазоне.

Таблица 3

### Полоса предельной относительной погрешности БИР

| Рабочий расход, м <sup>3</sup> /ч | Предельная относительная погрешность нормирования, + % | Предельная относительная погрешность нормирования, - % | Предельная относительная погрешность расчетная, % |
|-----------------------------------|--|--|---|
| 1                                 | 2,20   | - 2,20   | 2,20  |
| 5                                 | 2,20   | - 2,20   | 2,20  |
| 5                                 | 1,20   | - 1,20   | 1,20  |
| 100                               | 1,20   | - 1,20   | 1,20  |
| 100                               | 0,84   | - 0,84   | 0,56  |
| 180                               | 0,84   | - 0,84   | 0,84  |
| 180                               | 0,71   | - 0,71   | 0,49  |
| 260                               | 0,71   | - 0,71   | 0,71  |
| 260                               | 0,64   | - 0,64   | 0,46  |
| 340                               | 0,64   | - 0,64   | 0,64  |
| 340                               | 0,59   | - 0,59   | 0,45  |
| 420                               | 0,59   | - 0,59   | 0,59  |
| 420                               | 0,56   | - 0,56   | 0,44  |
| 500                               | 0,56   | - 0,56   | 0,56  |
| 500                               | 0,54   | - 0,54   | 0,43  |
| 580                               | 0,54   | - 0,54   | 0,54  |
| 580                               | 0,52   | - 0,52   | 0,43  |
| 660                               | 0,52   | - 0,52   | 0,52  |

Таким образом, в результате подключения сопел диапазон измерений БИР увеличивается в 6,6 раз. Одновременно более чем в 2 раза повышается точность измерения БИР на больших расходах, так как большая часть потока газа измеряется с высокой точностью критических сопел. Кроме того, наличие задаваемых соплами реперных точек расхода позволяет корректировать мультипликативную составляющую погрешности расходомера.

В *табл. 4* приведено сравнение двух пунктов учета и редуцирования, имеющих одинаковую верхнюю границу диапазона измерения, БИР и типового пункта ПУРДГ-Ш400.

При одинаковых верхних границах диапазона измерения БИР на базе RABO Y G65 обеспечивает по сравнению с ПУРДГ-Ш 400 на базе RABO Y G650 в 2,3 раза меньшую предельную относительную погрешность измерения в верхней границе диапазона измерения и в 6,6 раза

большой динамический диапазон измерения. При этом, учитывая большую разность цен на расходомеры G650 по сравнению с G65, можно получить также выигрыш и в цене БИР. Например, цена измерительного комплекса на базе RABO Y G650, который применяется в пункте учета и редуцирования ПУРДГ-Ш 400, на 140 тыс. руб. превосходит цену комплекса на базе RABO Y G65, применяемого в БИР. Учитывая, что дополнительные затраты на критические сопла и электромагнитные клапаны для БИР, имеющих меньшую пропускную способность и цену, составляют сумму не более 60 тыс. руб., получим сниженные стоимости основных комплектующих БИР по сравнению с ПУРДГ-Ш 400 на 80 тыс. руб.

Таблица 4

**Сравнение метрологических характеристик пунктов учета и редуцирования природного газа БИР на базе RABO Y G65 и ПУРДГ-Ш 400 на базе RABO Y G650**

| Метрологические характеристики пунктов учета и редуцирования                            | БИР на базе RABO Y G65 | ПУРДГ-Ш 400 на базе RABO Y G650 |
|---|------------------------|---------------------------------|
| Верхняя граница диапазона измерения расхода в рабочих условиях, м <sup>3</sup> /ч       | 660                    | 650                             |
| Предельная относительная погрешность измерения в верхней границе диапазона измерения, % | 0,52                   | 1,2                             |
| Нижняя граница диапазона измерения расхода в рабочих условиях, м <sup>3</sup> /ч        | 1,0                    | 6,5                             |
| Предельная относительная погрешность измерения в нижней границе диапазона измерения, %  | 2,2                    | 2,2                             |
| Динамический (относительный) диапазон измерения   | 1:660                  | 1:100                           |

**Заключение**

Таким образом, в предлагаемой структурной схеме БИР с параллельными ветвями учета – стандартной, включающей в себя преобразователь расхода и регулятор давления, рассчитанные на малый расход газа, и ветви с блоком критических сопел – достигается улучшение основных технических и функциональных характеристик в сравнении с аналогичными по пропускной способности пунктами учета и редуцирования:

- снижается относительная погрешность измерения до 0,5 %;
- расширяется динамический диапазон измерений;
- снижается стоимость основных комплектующих пункта учета и редуцирования;
- в результате применения для измерения расхода газа критических сопел повышается долговременная стабильность метрологических характеристик БИР.

*Автор благодарен руководителю АО «ПромСервис» за поддержку при проведении данной работы.*

*Список литературы:*

1. Мингалева А.В., Горчев А.И., Фафулин В.А., Михеев Н.И. Государственный первичный эталон единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118–2013 // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 3-6.
2. Триацкий В.М., Рогожинский Д.Л., Герасимов А.П. Способ измерения расхода на газораспределительных станциях при помощи критических сопел / А. с. № 1530912. Бюл. № 48. 23.12.89 г.
3. Герасимов А.П., Иванов В.П., Красавин В.М., Лавров В.М., Раинчик С.В., Семенова О.К. Область применения сопел Лавала в расходоизмерительной технике // Измерительная техника. 2005. № 4. С. 48-52.

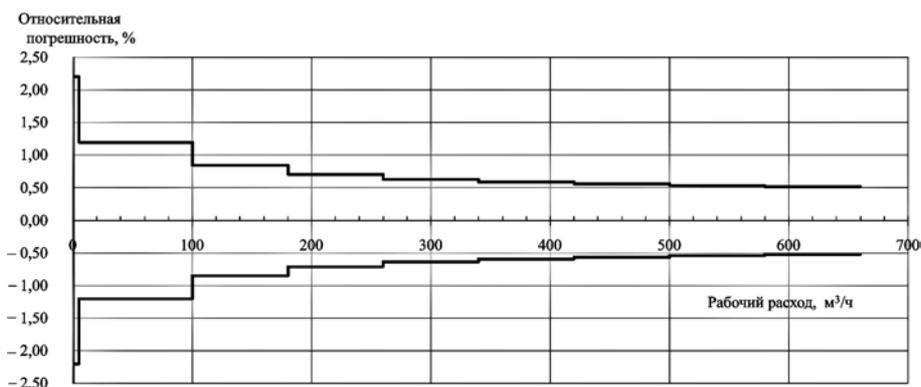


Рис. 7. Нормированная полоса предельной относительной погрешности БИР с тремя критическими соплами

4. *Цыбульский О.А.* Клапан и система измерения расхода газообразной среды / Патент РФ № 2544258. Бюл. № 8. 20.03.2015 г.
5. *Цыбульский О.А.* Импульсный счетчик-расходомер газа // Мир измерений. 2013. № 4. С. 11-16.
6. *Цыбульский О.А.* Импульсный счетчик-расходомер газа «Прамер-210 Ех // Приборы. 2014. № 12. С. 21-27.
7. *Кремлевский П.П.* Расходомеры и счетчики количества вещества. Ч. 1. – СПб.: Политехника, 2002. С. 408.
8. *Цыбульский О.А.* Система измерения расхода газа / Патент РФ № 2709439. Изобретения. Полезные модели. Бюл. № 35. 2019.
9. *Тыбульскй О.А.* System for measuring gas flow / Международная патентная заявка № PCT/RU2020/000137. Оpubл. WO 2020/204758 A1. 08.10.2020 г.
10. *Гущин О.Г., Курин Д.Ю.* К вопросу о точности измерений природного газа парциальными расходомерами (ГАЗЭЛЕКТРО). Опубликовано 02.07.2014 / [https://gaselectro.ru/statik\\_voprosu\\_o\\_tochnosti\\_izmerenij\\_prirodnogo\\_gaza\\_parcialnymi\\_rashodomerami.html](https://gaselectro.ru/statik_voprosu_o_tochnosti_izmerenij_prirodnogo_gaza_parcialnymi_rashodomerami.html).
11. *Касимов А.М., Попов А.И.* Расходомер газа / Патент РФ № 2396516. Бюл. № 22. 2010.
12. *Попов А.И., Беляев М.М.* Возможные диапазоны струйного расходомера / XIII Всероссийское совещание по проблемам управления. Москва, 17-20 июня 2019 г.
13. *Хоружев Г.М.* Потери давления на вихревых расходомерах. Правда и вымысел // СФЕРА Нефтегаз. 2010. № 1. С. 20-22.
14. *Цыбульский О.А.* Разработка модификации импульсного расходомера газа «Прамер-210Ех» с диапазоном измерения от 1 до 600 м<sup>3</sup>/ч, приведенных к стандартным условиям / Объединенная конференция: XII Международная конференция «НЕФТЕГАЗСТАНДАРТ-2017» и V Международная метрологическая конференция «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов». Казань, Россия. 6-7 сентября 2017 г. С. 234-237.

*Олег Андреевич Цыбульский,*  
канд. техн. наук, руководитель,  
лаборатория расходомерии,  
АО «ПромСервис»,  
г. Димитровград, Ульяновская обл.,  
e-mail: multimer@list.ru

*Поздравляем юбиляра!*

*В мае 2021 года исполняется 85 лет Льву Константиновичу Исаеву – доктору технических наук, профессору, заслуженному метрологу Российской Федерации, научному руководителю направления по законодательной метрологии и методическому руководству в деятельности ГРЦСМИ.*



Трудовая деятельность Льва Константиновича посвящена метрологии во всех ее направлениях: в научном, законодательном, организационно-методическом, международном и учебно-педагогическом.

Под руководством Льва Константиновича создавалась современная эталонная база, развивались новые перспективные научные направления в метрологии, успешно решались проблемы государственной метрологической службы и международного сотрудничества. Высококвалифицированный специалист, известный ученый, Лев Константинович принимал участие в создании Российской системы измерений и первого Федерального закона по метрологии – «Об обеспечении единства измерений».

Много сил и энергии отдает Лев Константинович развитию и укреплению научно-исследовательских институтов системы Росстандарта, их взаимодействию с национальными метрологическими институтами передовых стран мира. Благодаря его усилиям и несомненному авторитету достижения отечественной метрологии получили признание за рубежом.

*Координационный совет Международного научно-технического общества приборостроителей и метрологов и редакция журнала «Приборы» сердечно поздравляют Льва Константиновича Исаева с 85-летием и желают ему новых творческих успехов.*