

# СТРУЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ОБЪЕМНЫХ И МАССОВЫХ РАСХОДОВ

**А.М. Касимов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [kasimov@ipu.ru](mailto:kasimov@ipu.ru)

**А.И. Попов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
[daten@ipu.ru](mailto:daten@ipu.ru)

**Ключевые слова:** струйный элемент, генератор, частота, расходомер, обратная связь.

**Аннотация:** Проведен анализ и синтез струйных расходомеров текучих продуктов с частотным выходом. Обосновывается преимущества построение преобразователей расхода из нескольких струйных элементов, соединенных по круговой схеме в мультивибратор. Приводятся примеры успешных применений.

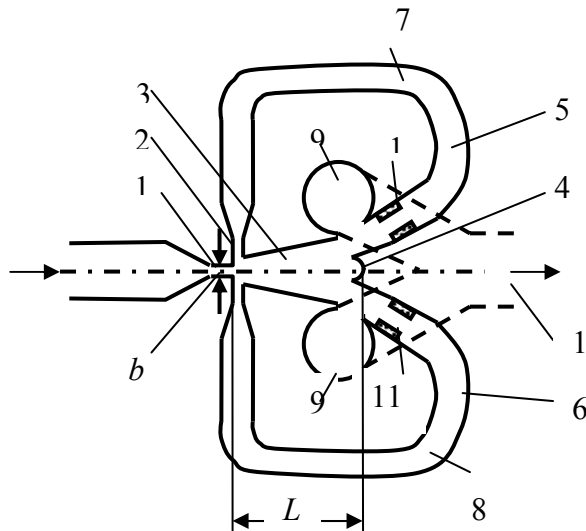
## 1. Введение

Струйные расходомеры представляют устройства, в которых за счет гидродинамической, специально организованной, неустойчивости протекающей жидкости или ее части возбуждаются колебания сигналов давления, частота которых пропорциональна объемному расходу. В [1] было показано, что частота струйного генератора (мультивибратора) определяется скоростью течения рабочей среды, которая зависит от величины давления питания и плотности рабочей среды. Но частота струйных генераторов может зависеть и от других параметров: температуры, вязкости и линейных размеров.

Среди различных схем построения струйных преобразователей расхода получили распространение автогенераторы на базе двухстабильного струйного элемента с двумя каналами обратной связи от выходных каналов к его управляющим соплам.

## 2. Влияние геометрических параметров струйных автогенераторов на характеристики струйных расходомеров

Большинство исследований посвящены расходомерам по схеме с двумя каналами обратной связи (рис. 1) [2-7]. Характеристики определяются в основном размерами проточной камеры и каналов обратных связей.



**Рис. 1.** Схема генератора на одном бистабильном струйном элементе: 1 – сопло питания входного канала, 2 – сопла каналов управления, 3 – камера взаимодействия струи со стенками, 4 – отражатель, 5, 6 – выходные каналы струйного элемента, 7, 8 – каналы обратной связи, 9 – дренажные каналы слива, 10 – выходной канал слива, 11 – дроссели канала обратной связи.

По ряду соображений, которые будут приведены ниже, в качестве первичных измерительных преобразователей расхода будут рекомендованы преобразователи другого типа. Но независимо от типа расходомеров общим требованием является пропорциональная зависимость между частотой и расходом.

Рассмотрим влияние элементов генератора для функции расходомера, среди которых основными являются скорость среды измерения, скорость переброса струи между стенками и скорость передачи сигналов давления по каналам обратной связи.

Можно ожидать, что нижний предел динамического диапазона расхода будет ограничиваться вязкостью, а верхний либо кавитацией (для жидкостей), либо эффектом сжимаемости для газов.

Основной переменной величиной является число Рейнольдса ( $Re$ ):

$$Re = \frac{Vb}{\nu},$$

где  $V$  – скорость потока в сопле питания струйного расходомера,  $b$  – характеристический размер (ширина сопла питания в плане),  $\nu$  – кинематическая вязкость.

Важным является число Струхалия ( $Sh$ ), выражающее отношение характеристического времени процесса  $b/V$  к периодическому времени колебания  $T$

$$(1) \quad Sh = \frac{b}{VT} = \frac{fb}{V},$$

где  $f$  – частота колебаний.

Условием пропорциональности частоты колебаний  $f$  от скорости течения является независимость числа  $Sh$  от числа  $Re$ , т.е.  $\frac{dSh}{dRe} = \text{const}$ .

Если период колебаний  $T$  будет множителем характеристического времени, то  $Sh$  станет постоянным, а частота  $f$  пропорциональна скорости  $V$  при неизменном размере  $b$ .

Размерный анализ показывает, что  $Sh = \Psi(Re)$ , т.е. отношение частоты колебания к скорости жидкости  $\frac{f}{V}$  для каждого расходомера зависит от отношения инерции к силам вязкости. При больших числах  $Re$  инерционные силы являются доминирующими над вязкостными. При низких числах  $Re$  вязкостные силы преобладают настолько, что в конечном счете колебания демфируются и прекращаются.

Т.о. существует минимальное число  $Re_{мин}$ , ниже которого функции расходомера не выполняется.

Если скорость  $V$  представить как

$$V = \frac{Q}{nb^2},$$

где  $Q$  – расход,  $nb^2$  – площадь поперечного сечения ( $n$  – отношение глубины сопла  $h$  к ширине сопла  $b$ ).

Подставляя в уравнение (1), получим

$$(2) \quad Q = \frac{fnb^2}{Sh},$$

Т.е. частота пропорциональна объемному расходу и обратно пропорциональна кубу линейного размера.

С учетом, что  $f = \frac{1}{T}$  представим (2) в виде

$$(3) \quad q = QT = \frac{nb^3}{Sh},$$

где  $q = QT$  – импульсный объем, который для данного типоразмера расходомера является постоянным. Т.о. подсчет импульсов будет показателем суммарного количества прошедшей через расходомер жидкости, а частота указывать ее объемный расход.

Точность будет определяться достижимой точностью в определении константы пропорциональности  $q$  (коэффициент калибровки).

Из формул (2) и (3) следует, что объемный расход не зависит от плотности измеряемой среды. С повышением плотности измеряемой среды растет перепад давления на расходомере при равных объемных расходах.

Из этого следует, что частота струйного расходомера линейно зависит от расхода и не требуется устройство извлечения квадратного корня. Это свойство струйного расходомера позволяет подключать его байпасно к стандартным сужающим устройствам (СУ) без устройства извлечения квадратного корня и измерять одним типоразмером струйного расходомера большой расход с пропорциональной характеристикой частоты от расхода. Естественно импульсная константа  $q$  будет другой, но при обязательном выполнении равными или близкими коэффициентов расхода расходомера и СУ.

*Влияние каналов ОС.* Канал обратной связи можно рассматривать как проточную камеру с докритическими турбулентными дросселями на входе 1 и выходе 2. Схема такой камеры представлена на рис. 2, где  $p_0$  давление на входе в камеру перед дросселем 1,  $p_1$  давление в камере и  $p_2$  давление сброса за дросселем 2 (давление окружающей среды). Камера имеет длину  $l$  и объем  $U$ .

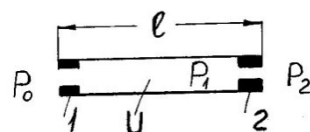


Рис. 2

Период колебаний  $T$  по рис. 1 можно представить как

$$T = 2(\tau_c + \tau_{чз} + \tau_k),$$

где  $\tau_c = L/V$  – время переключения струи в противоположное положение,  $L$  – длина пролета струи в камере взаимодействия 3 (рис. 1),  $V$  скорость струи;  $\tau_{чз} = l/a$  время чистого запаздывания, где  $l$  длина канала ОС,  $a$  – скорость звука;  $\tau_k$  – время набора давления управления, необходимого для переключения струи в противоположное положение. Каналы ОС представляют инерционные звенья, на вход которых с выходных каналов струйного элемента подаются пульсирующие сигналы давления.

Примем, что течение в дросселях адиабатическое, а температура в камере сохраняет то же значение, что и в пространстве перед входным дросселем 1.

Рассмотрим малые колебания, при которых абсолютное давление в камере незначительно отклоняется от среднего значения.

Для докритических истечений в дросселях 1 и 2 «постоянная» времени камеры выражается формулой [8]

$$T_k = \frac{U}{s_2 \sqrt{K}} \Psi_v,$$

где  $U$  – объем камеры,  $s_2$  – эффективная площадь сечения выходного дросселя,  $K$  – абсолютная температура среды,  $\Psi_v$  – коэффициент.

Коэффициент  $\Psi_v$  в обоих дросселях определяется по формуле

$$\Psi_v = \frac{1}{\sqrt{2gR \frac{k}{k-1} \left[ \frac{s_1}{s_2} \varphi(r_1) + \varphi(r_2) \right]}},$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $R$  – газовая постоянная,  $k$  – показатель адиабаты,  $r_1 = \bar{p}_1 / \bar{p}_0$ ,  $r_2 = \bar{p}_2 / \bar{p}_0$  – отношение средних абсолютных давлений – здесь  $\bar{p}_0$ ,  $\bar{p}_1$ ,  $\bar{p}_2$  – средние за процесс абсолютные давления перед входным дросселем, в камере и за выходным дросселем,  $s_1, s_2$  – эффективные площади сечения входного и выходного дросселей.

$$\varphi_1(r_1) = \frac{\frac{k+1}{k} r_1^{\frac{k+1}{k}} - \frac{2}{k} r_1^{\frac{2}{k}}}{2r_1 \sqrt{r_1^{\frac{2}{k}} - r_1^{\frac{k+1}{k}}}},$$

$$\varphi_2(r_2) = \frac{\frac{k-1}{k} (2r_2^{\frac{2}{k}} - r_2^{\frac{k+1}{k}})}{2r_2 \sqrt{r_2^{\frac{2}{k}} - r_2^{\frac{k+1}{k}}}}.$$

Расчеты, проведенные по указанным формулам, показывают, что «постоянная» времени камеры увеличивается с увеличением скорости среды в струйном элементе. Т.е. доля времени передачи сигналов давления по ОС увеличивается. Это обстоятельство определяет нелинейность зависимости частоты от расхода.

Время  $\tau_k$  по данным [8, 9] нелинейно и существенно зависит от перепада давления на входе в канал (камеру) и с повышением давления увеличивается. Это сильно ограничивает повышение быстродействия струйных цепей управления, а в нашем случае сужает линейный диапазон характеристики  $f = F(Q)$ .

С увеличением частоты колебаний с ростом расхода под действием увеличивающегося перепада давления, увеличивается амплитуда сигналов давления передаваемых по каналам ОС генератора. Ранее было показано, что  $\tau_k$  при этом увеличивается, как за счет амплитуды, так и за счет длины (объема) канала ОС. Поэтому  $\tau_k$  нужно свести к

минимуму, чтобы уменьшить его долю в составе  $T_k$ . Но в расходомере на одном бистабильном элементе длину каналов ОС нельзя сделать меньше длины камеры взаимодействия генератора.

Это противоречие решается, если строить мультивибратор из трех струйных элементов, соединенных последовательно по кольцевой схеме, как показано на рис. 3. Нечетное количество элементов позволяет свести к минимуму коммуникационные каналы между элементами конструктивно устранить их перекрещивание.

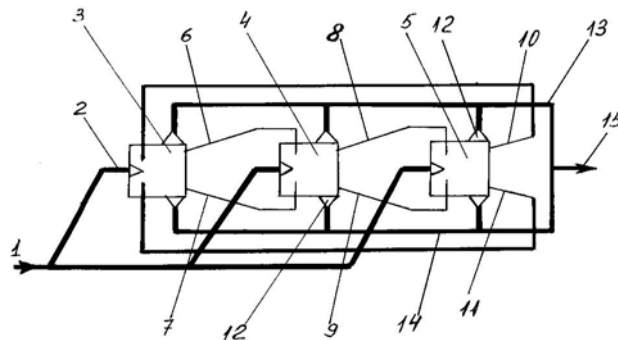


Рис. 3. Схема кольцевого мультивибратора с 3-я элементами.

На рис. 3. обозначены: 1 канал подвода питания к соплам 2 струйных элементов 3, 4, 5. Каналы 6 и 7, 8 и 9, 10 и 11 струйных элементов соединяют их взаимоинверсные выходы соответственно с входными каналами следующих по замкнутому кольцу элементов. Левые и правые дренажные приемники 12 струйных элементов сводятся в приемные каналы 13 и 14 и далее на выход 15. Каналы 6, 7, 8, 9, 10 и 11 практически минимальны по длине, около 0,25 длины камеры струйных элементов. Период колебаний такого кольцевого мультивибратора увеличивается по сравнению с генератором на одном элементе в три раза при том же расходе, но благодаря увеличению доли времени на переключение струй  $\tau_c$  характеристика  $f = \varphi(Q)$  улучшается. Кроме того, снижается минимальный перепад давления, при которых возникают устойчивые колебания, в связи с повышением коэффициента усиления из-за последовательного соединения струйных усилителей. Последний элемент (на схеме – 5) развернут в обратную сторону, замещая каналы ОС в генераторе с одним элементом. Нечетное количество струйных элементов обеспечивает их простую послойную сборку, устраняя перекрещивающиеся каналы.

Такой струйный расходомер с диапазоном измерения 1:10 укладывается в класс – 1, с диапазоном 1:20 – в класс 1,5.

На рис. 4 приведены экспериментальные характеристики погрешности измерения, частоты колебаний и потери давления от объемного расхода

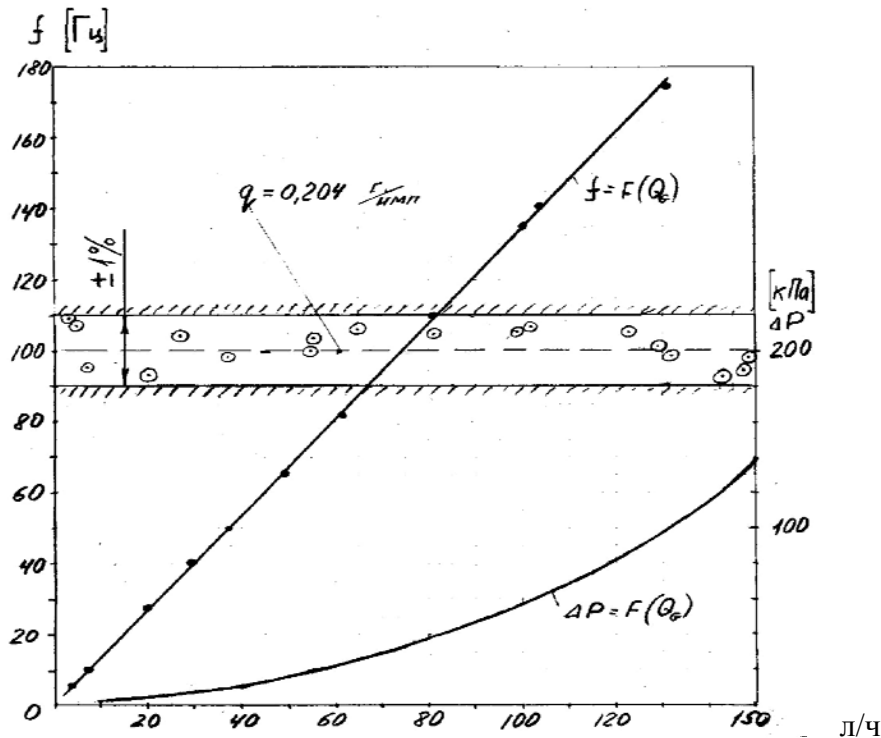


Рис. 4. Экспериментальные характеристики погрешности измерения, частоты колебаний и потери давления от объемного расхода.

Для измерения массового расхода следует вывести величину перепада давления  $\Delta p$  на струйном расходомере, который пропорционален плотности измеряемой среды и квадрату скорости или

$$(4) \quad \Delta p = \beta \rho V^2,$$

где  $\rho$  – плотность среды,  $V$  – средняя скорость среды,  $\beta$  – коэффициент пропорциональности.

С учетом формулы для объемного расхода, выражая скорость через частоту преобразуем (4) и запишем для массового расхода выражение:

$$Q_m = \psi \frac{\Delta p}{f} = \frac{\beta \rho V^2 b^3}{\alpha V} = \varphi \rho V,$$

где  $\varphi = \frac{\beta b^3}{\alpha}$ ,  $\psi$ ,  $\alpha$  – постоянные коэффициенты.

Поскольку струйный расходомер является расходомером переменного перепада давления, то, имея один минимальный типоразмер струйного расходомера, целесообразно его подключать байпасно относительно стандартных сужающих устройств (сопло, диафрагма и т. п.), как показано на рис. 5, где 1 – струйный расходомер, с генератором 2 и вычислителем 3, импульсные трубки 4 и сужающее устройство 5. В этом случае импульсный объем  $q$  расходомера увеличивается, сохраняется один типоразмер 1 преобразователя с фиксированным диапазоном изменения выходной частоты.

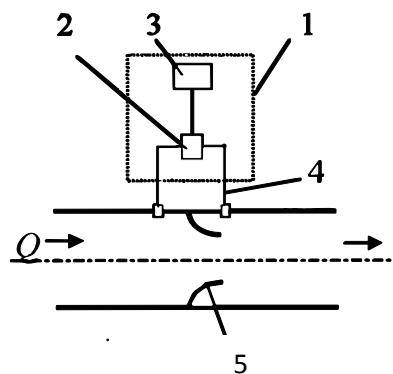


Рис. 5

Расширение диапазона измерения обеспечивается унифицированным набором сужающих устройств 5. В этом случае импульсный единичный объем каждого типоразмера, определяется по формуле  $q = Q/f_c$ , где  $Q = Q_{cy} + Q_c$ . Здесь  $Q_{cy}$  – расход через сужающее устройство в основной трубе и  $Q_c$  – расход по измерительному каналу.

Таким образом, в расходомере любого типоразмера объемный расход определяется одним стандартным (типовым) сужающим устройством и струйным расходомером 2 с вычислителем 3.

Струйные расходомеры с байпасом были разработаны для измерения водяного теплоносителя высоких параметров ( $t=270^\circ\text{C}$ , давление 14МПа) и испытывались на Ленинградской АЭС два года непрерывно без рекламаций [10]. Для коммунального хозяйства разработаны и выпускаются бытовые струйные счетчики газа СГ-1 и СГ-2 (НПФ «РЕГИСТР», г. Омск, ОАО «ТЕХПРИБОР» г. Орел и др.).

В Израиле разработан струйный расходомер IRIS-6, измеряющий расход бытового газа в диапазоне 0,02-6 м<sup>3</sup>/ч, который прошел Европейскую сертификацию.

### 3. Заключение

Представленные результаты исследований подтверждают перспективность построения струйных частотных расходомеров на основе кольцевых мультивибраторов для широкого спектра применения, таких как измерение скоростей, в том числе скоростей подвижных тел.

### Список литературы

1. Касимов А.М. Влияние физических свойств рабочей среды на протекание переходных процессов в струйных элементах // В кн. «Струйная техника автоматического управления». М.: Наука, 1965. С. 437-454.
2. Wilson M.P., Coogan C.H., Southall K. Experimental Investigation of a Fluidic Volume Flowmeter // J. Basic Eng. 1970. Vol. 92, No. 1. P. 139-142.
3. Adams R.B. A Coanda Fluidic Flowmeter // IFAC Proceedings Volumes. 1975. Vol. 8, No. 1, part 4. P. 503-509.
4. Tippets J.R., Ng H.K., Royle J.K. An oscillating bistable fluid amplifier for use as a flowmeter // Automatica. 1973. Vol. 9, No. 1. P. 35-42, 43-45.
5. Andreiv N. Fluidic oscillator measures flow // Control Engineering. 1973. Vol. 20, No. 9.
6. Honda S., Yamasaki H. A new hydrodynamic oscillator type flowmeter // Fluid control and measurement, 1986. Vol. 2. P. 623-628.

7. Аристов П.К., Белоусов Г.В., Евсюткин В.С., Хлыст В.С., Кипнис А.М. Струйный автогенераторный расходомер-перепадомер РПС // Измерительная техника. 1996. № 2. С. 36-37.
8. Залманзон Л.А. Анализ схем преобразования сигналов элементами струйной пневмогидроавтоматики // Пневматические приводы и системы управления. М.: Наука, 1971. С. 240-245.
9. Альперович Е.С., Ванский Ю.В., Касимов А.М. и др. Струйный расходомер // Fluidic and engineering in control systems. VIII конференция по флюидике. Preprints. Iunie, Bucuresti, Romania, 1980.
10. Касимов А.М., Виногоров С.Г., Климов А.Н. Результаты исследований и разработка струйного расходомера теплоносителя для АЭС // ПНЕВМОАВТОМАТИКА. Тезисы докладов XV Всесоюзного совещания. Ч. 2. М., 1985. С. 76-77.