

**ПРИМЕНЕНИЕ РАСШИРЕНИЯ РУСЛА
В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА
РАСХОДОМЕРА ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ**

Даев Ж. А., Латышев Л.Н.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет
кафедра АПП, LNL1@yandex.ru;*

В статье рассмотрен вопрос применения гидравлических сопротивлений в качестве чувствительных элементов. Предлагается применение расширяющих устройств в качестве первичных преобразователей потока для измерения расхода жидкостей и газов. Описаны теоретические основы метода.

Ключевые слова: *газ, расход, перепад давления, измерение, чувствительный элемент, расширение русла, теория, рекомендации*

Как известно, под местными сопротивлениями подразумевают участки трубопроводов, где течение отличается от стабилизированного потока. Принято считать, что возмущения, вносимые этими участками, носят локальный характер и их влияние учитывается коэффициентами сопротивлений [1].

В практике измерения расхода используются некоторые типы местных сопротивлений в качестве чувствительных элементов (первичных преобразователей) расхода жидкости или газа для расходомеров переменного перепада давления. Если быть точнее, это все типы сужающих устройств (диафрагма, труба Вентури, различные виды сопел, сегментная диафрагма, труба Далла и т.п.); повороты (криволинейные трубы); кольцевые участки трубы; трубное сопротивление, представляющее собой элемент трубопровода, создающий перепад давления [2].

Сужающие устройства очень часто применяются в качестве первичных преобразователей при измерении расходов, особенно стандартные диафрагмы. Достоинства этих устройств – это конструктивная простота (они не требуют для поверочных работ дорогостоящих образцовых устройств) и простота в эксплуатации.

Для расходомеров с сужающими устройствами расход вычисляется по следующей формуле

$$q_0 = CE \varepsilon F_0 \sqrt{2\Delta p / \rho},$$

где ε - коэффициент расширения, учитывающий увеличение удельного объема для газа; $F_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ - площадь отверстия сужающего устройства; ρ - плотность; Δp - перепад, создаваемый сужающим устройством; E - коэффициент скорости входа, который является отношением энергии давления к кинетической энергии струи α ; C - коэффициент истечения, представляющий собой отношение реального расхода к теоретическому. Произведение $C \cdot E = \alpha$ называют коэффициентом расхода.

Правильная работа расходомеров с сужающими устройствами зависит от многих факторов, которые влияют на коэффициент расхода. Такими факторами могут быть: изменения геометрических размеров диафрагмы, которые могут быть вызваны гидроударами в трубопроводе (как правило, диафрагма получает деформацию относительно вертикальной оси), неизбежное притупление входной острой кромки [3], шероховатость измерительного трубопровода, расстояния между местными сопротивлениями в измерительном трубопроводе и т.д. Все требования, предъявляемые к расходомерам с диафрагмами, описаны в [4].

Среди различных видов сопротивлений наибольший интерес представляют закругленные участки трубопроводов, изменяющие направление потока и создающие под влиянием центробежной силы перепад давлений в противоположных точках сечения трубы.

Для расходомеров с закругленными участками трубы используют следующее уравнение

$$q_0 = \alpha \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{R_0}{2D}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

где α - коэффициент расхода, D - диаметр колена трубы, R_0 - осевой радиус закругления, ρ - плотность, Δp - перепад давления, создаваемый центробежной силой.

Расходомеры с такими чувствительными элементами характеризуются меньшим перепадом давления, чем у сужающих устройств, большим разбросом значений коэффициентов расхода [2]. На точность показаний расходомера влияют отложения в трубах, повышенная шероховатость внутренней поверхности колена, неправильность формы изгиба.

В данной работе рассмотрим вопрос применения таких местных сопротивлений, которые расширяют поток в качестве первичных преобразователей потока.

Для начала рассмотрим в качестве чувствительного элемента внезапное расширение потока.

Значения коэффициентов местных потерь в большинстве случаев получают из опытов, на основании которых выводят эмпирические зависимости. Однако для внезапного расширения русла при турбулентном течении потерю напора (давления) можно достаточно точно найти теоретическим путем.

При внезапном расширении русла (рис. 1) поток срывается с угла и постепенно расширяется, причем в кольцевом пространстве между потоком и стенкой трубы образуются вихри, которые и являются причиной потерь энергии.

Рассмотрим два сечения горизонтального потока: 1 – 1 – в плоскости расширения трубы и 2 – 2 – в том месте, где поток, расширившись, заполнил все сечение широкой трубы. Поток между рассматриваемыми сечениями расширяется, поэтому скорость его уменьшается, а давление постепенно возрастает. При этом присутствует потеря давления, показанная на рисунке. Рассматриваемая потеря давления (энергии) при внезапном расширении русла (трубы) расходуется, можно считать, исключительно на вихреобразование, связанное с отрывом потока от стенок. Поэтому этот вид потерь энергии, пропорциональных скорости (расходу) во второй степени, называют потерями на вихреобразование.

Составим уравнение движения жидкости или газа с некоторыми допущениями, которые существенно не повлияют на работу расходомерного устройства:

— распределение скоростей в сечениях 1 – 1 и 2 – 2 равномерное, т.е. коэффициенты Кориолиса будем считать равными единице, хотя можно сделать расчет для отличных от единицы значений данных коэффициентов;

— касательные напряжения на стенке трубы между сечениями 1 – 1 и 2 – 2 равны нулю, т.е. сила трения пренебрежимо мала;

— в уравнении Бернулли $z_1 = z_2 = 0$, т. е. участок горизонтальный;

— плотность будем считать постоянной.

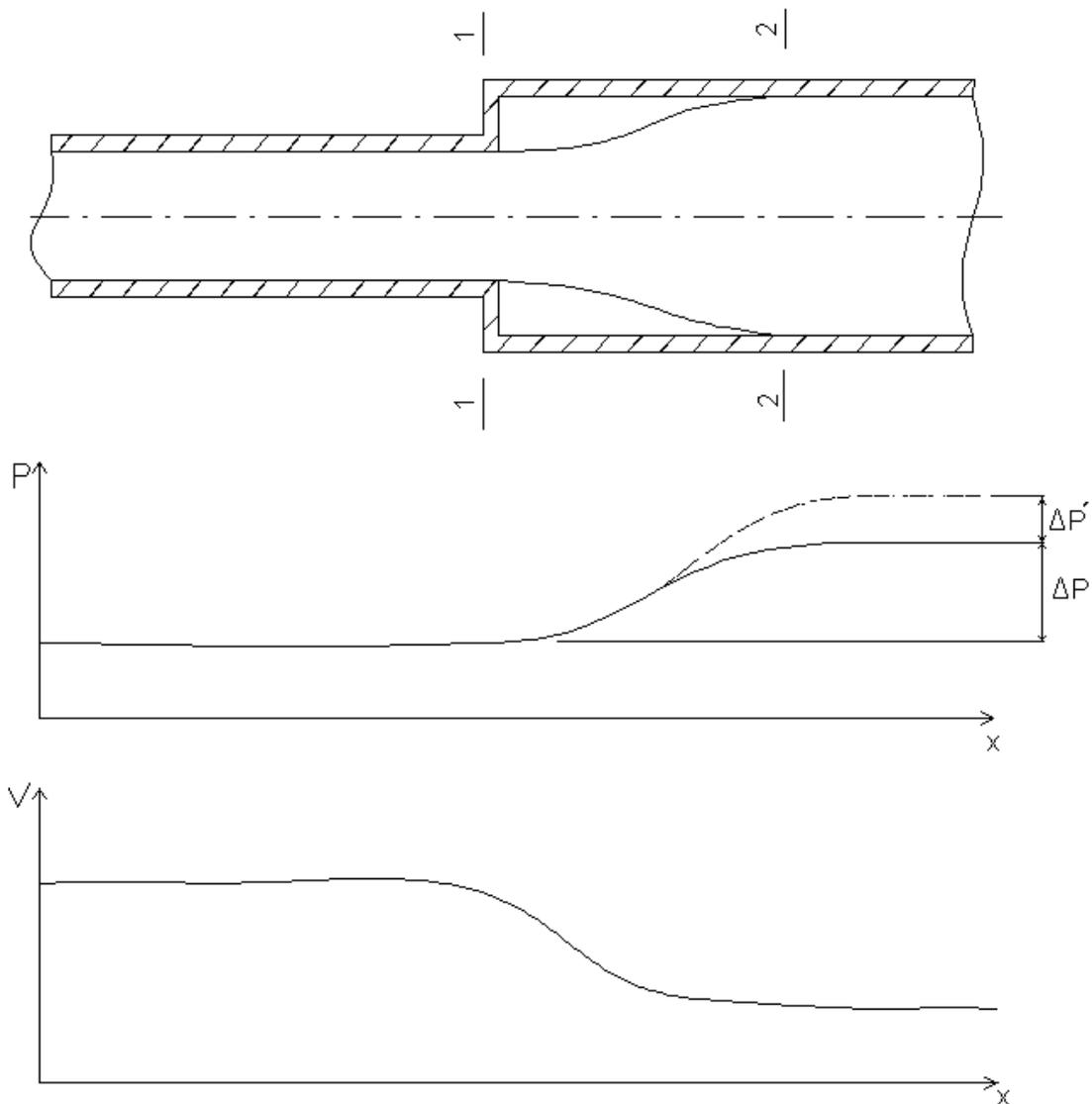


Рисунок 1. Схема течения жидкости (газа) через внезапное расширение трубы

Решив уравнение, выражающее закон сохранения энергии (уравнение Эйлера или Бернулли):

$$\int v dv = \int \frac{dp}{\rho} \quad (1)$$

совместно с уравнением неразрывности потока:

$$q_m = \rho q_0 = \rho v F = const, \quad (2)$$

где q_m и q_0 - массовый и объемный расходы, v - скорость потока, p - давление, а F - площадь поперечного сечения потока, можно получить зависимость между расходом и перепадом давления.

Учитывая, выше перечисленные допущения уравнения (1) и (2) принимают следующий вид:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \xi \frac{v_2^2}{2} \quad (3)$$

$$q_m = \rho v_1 F_1 = \rho v_2 F_2, \quad (4)$$

где ξ - коэффициент потерь на участке 1 – 1 и 2 – 2, F_1 и F_2 - площади потока в сечениях 1 – 1 и 2 – 2 соответственно.

в классической гидравлике потеря напора при внезапном расширении рассчитывается (определяется) по формуле Борда [5]:

$$h_{расш} = \xi \frac{v_2^2}{2g} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad (5)$$

Совместное решение формулы Борда и уравнения неразрывности позволяет определить значение коэффициента потерь для внезапного расширения русла:

$$h_{расш} = \left(\frac{F_2}{F_1} - 1\right)^2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} \quad (6)$$

$$\xi = \left(\frac{F_1}{F_2} - 1\right)^2 = \left(\frac{D_2^2}{D_1^2} - 1\right)^2 = (\beta^2 - 1)^2 = (m - 1)^2, \quad (7)$$

где β - относительный диаметр расширяющего устройства, только в отличие от относительного диаметра сужающего устройства он больше единицы, т.е. в данном методе $\beta > 1$. Величина $m = \beta^2$ называется относительной площадью.

Из (4) найдем значение $v_1 = mv_2$, подставив его в (3) и учитывая (7) получим следующее выражение:

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} = v_2^2 (m - 1). \quad (8)$$

Выразим скорость из (8)

$$v_2 = \sqrt{\frac{\psi}{\beta^2 - 1}} \cdot \sqrt{\frac{p_2' - p_1'}{\rho}}. \quad (9)$$

Параметр ψ называется коэффициентом отбора $\psi = \frac{p_2 - p_1}{p_2' - p_1'}$. Данный коэффициент учитывает, что точки отбора давлений p_1' и p_2' могут не совпадать с сечениями 1 – 1 и 2 – 2. Если отбор давлений будет производиться строго в этих сечениях, то коэффициент $\psi = 1$.

Подставляя значения F_2 и v_2 из уравнения (9) в уравнение (2), получим:

$$q_m = \alpha F_2 \sqrt{\rho \Delta p} \quad (10)$$

$$q_0 = \alpha F_2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}, \quad (11)$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{\psi}{\beta^2 - 1}} \quad (12)$$

является коэффициентом расхода расширяющего устройства.

Формулы (10) и (11) справедливы для жидкостей. Для газа, как известно, их надо умножать на коэффициент расширения ε , учитывающий увеличение удельного объема (уменьшение плотности) газа. Окончательно получаем универсальные формулы для расчета расхода вещества:

$$q_m = \alpha \varepsilon F_2 \sqrt{\rho \Delta p} = \alpha \varepsilon \frac{\pi D_2^2}{4} \sqrt{\rho \Delta p} \quad (13)$$

$$q_0 = \alpha \varepsilon F_2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} = \alpha \varepsilon \frac{\pi D_2^2}{4} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}. \quad (14)$$

Построим зависимость $\alpha = f(m)$ (рис. 2) для внезапного расширения русла. Значения относительной площади будем выбирать обратными значениям m диафрагмы.

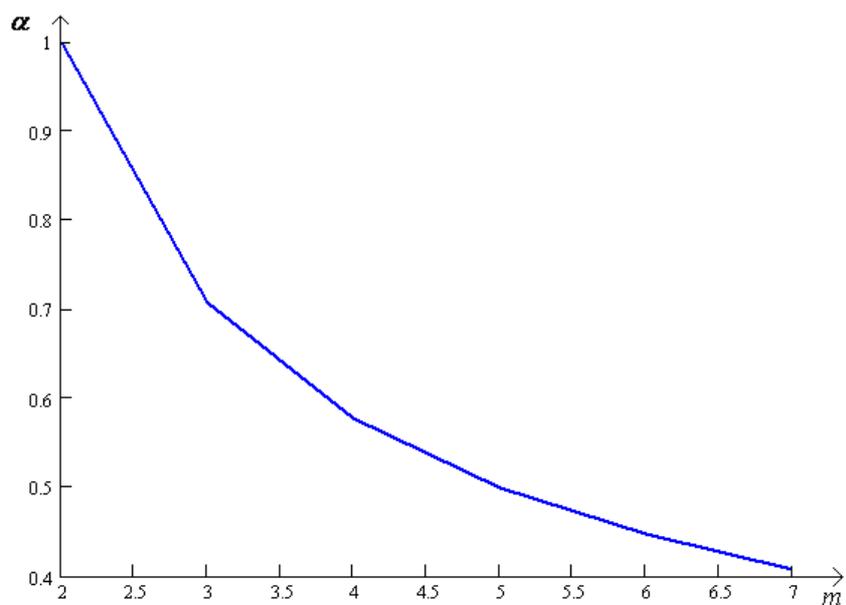


Рисунок 2. Зависимость $\alpha = f(m)$ для внезапного расширения русла, где α - коэффициент расхода, $m = \beta^2$ - относительная площадь

Теперь рассмотрим вопрос о применении в качестве первичного преобразователя расхода постепенно расширяющуюся трубу, называемую диффузором. Течение жидкости (газа) в диффузоре сопровождается уменьшением скорости и увеличением давления. Частицы движущейся жидкости преодолевают нарастающее давление за счет своей кинетической энергии, которая уменьшается вдоль диффузора в направлении от оси к стенке. Слои, прилежащие к стенкам, обладают столь малой кинетической энергией, что оказываются не в состоянии преодолеть повышенное давление, они останавливаются или начинают двигаться обратно. Противоток вызывает отрыв основного потока от стенки и вихреобразования. Интенсивность этих явлений возрастает с увеличением угла расширения диффузора, а вместе с этим растут и потери на вихреобразования в нем [5]. Этот факт можно использовать для того, что бы получить интересные нас перепады давления.

Попытаемся получить уравнение измерения расхода для диффузора. Потери напора в диффузоре рассматривают как сумму потерь на трение и расширение.

В [5] приведены уравнения для расчета этих потерь

$$h_{mp} = \frac{\lambda}{8 \sin(\varphi/2)} (m-1) \frac{v_2^2}{2g} \quad (15)$$

Потери на расширение рассчитываются по формуле (6), но с поправочным коэффициентом $k = \sin \varphi$, $k < 1$, $5^\circ \leq \varphi \leq 20^\circ$:

$$h_{расш} = k (m-1)^2 \frac{v_2^2}{2g} \quad (16)$$

Учитывая (15) и (16) получим полные потери напора в диффузоре

$$h = \left[\frac{\lambda}{8 \sin(\varphi/2)} (m-1) + k (m-1)^2 \right] \frac{v_2^2}{2g} \quad (17)$$

Из (17) получаем коэффициент сопротивления диффузора

$$\xi_{диф} = \frac{\lambda}{8 \sin(\varphi/2)} (m-1) + k (m-1)^2$$

или

$$\xi_{диф} = m^2 A - 2km - B, \quad (18)$$

где $A = \frac{\lambda}{8 \sin(\varphi/2)} + k$, $B = \frac{\lambda}{8 \sin(\varphi/2)} - k$.

Теперь совместное решение уравнений (3), (4) и (17) дает

$$q_0 = \alpha F_2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}, \quad (19)$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{\psi}{Am^2 - (2k+1)m + B + 1}}. \quad (20)$$

Из (20) мы видим, что коэффициент расхода диффузора является функцией двух переменных: угла расширения и относительной площади.

Анализ формулы (20) показывает, что угол расширения диффузора следует выбирать, начиная от 13° . С другой стороны мы ограничены требованиями к диффузорам $\varphi \leq 20^\circ$, так как $5^\circ \leq \varphi \leq 20^\circ$ для $k = \sin \varphi$.

Зависимость между коэффициентом расхода и относительной площадью для диффузора отражена на рис. 3.

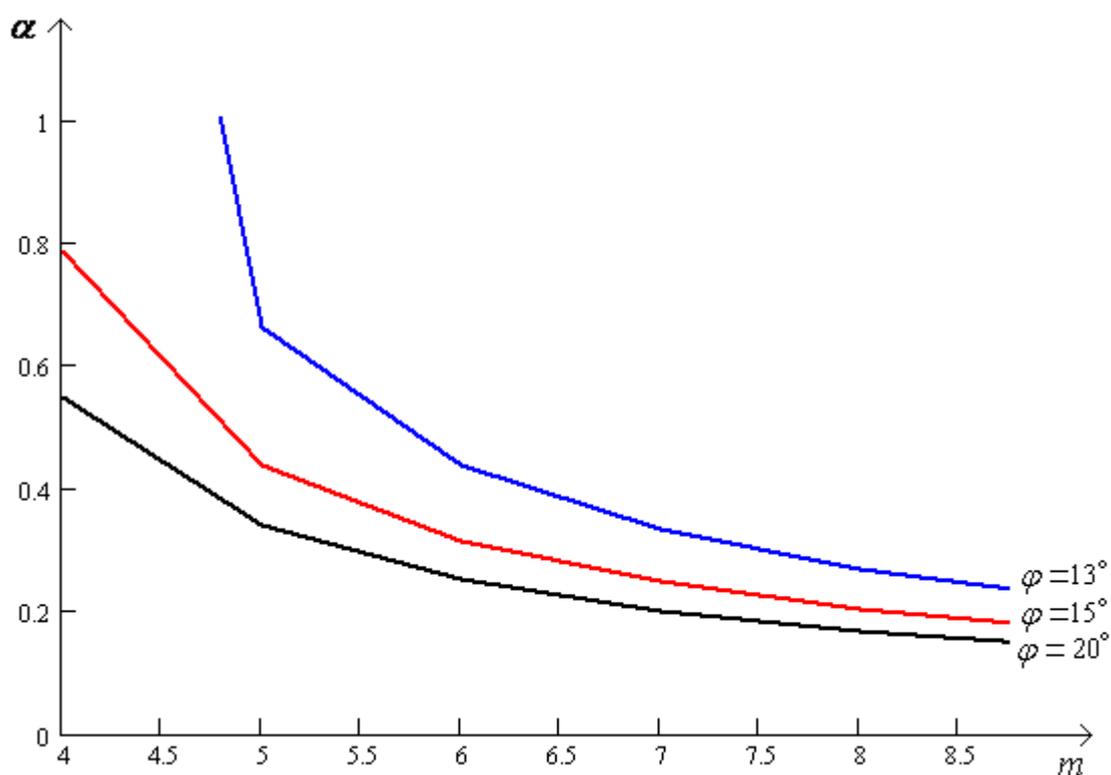


Рисунок 3. Зависимость $\alpha = f(m)$ для диффузора, где α - коэффициент расхода, $m = \beta^2$ - относительная площадь

Давления должны отбираться, как видно из вышеизложенного, инверсно методу с сужающим устройством. Значения прямолинейных длин участков трубопроводов требуют экспериментального исследования.

Опыт применения сужающих устройств показывает, что метод, хотя очень прост и обладает преимуществами, не лишен ряда серьезных недостатков, которые описывались выше. Особенно диафрагма уязвима по отношению к радиусу притупления и гидроударам, которые изменяют ее геометрические размеры и приводят к искажению значений коэффициента расхода.

Выводы

1. Расширяющие устройства более устойчивы к гидроударам, отсутствует погрешность (неопределенность) от притупления кромки. Единственным недостатком расширяющих устройств является невозможность менять отверстие расширяющего устройства при эксплуатации. Данного недостатка лишена диафрагма. Несмотря на этот недостаток, расширяющие устройства можно применять на коммерческих узлах замера расхода газа и жидкостей с постоянными потребностями энергоносителей.

2. Главным преимуществом расширяющих устройств является известное уравнение коэффициента расхода, которое поддается теоретическому анализу.

Литература

1. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Гидрогазодинамика. М.: Энергоатомиздат, 1984. - 384 с.
2. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн.1. Спб.: Политехника, 2002. - 409 с.
3. Алланиязов Х.А. Исследование изменения остроты входной кромки диафрагмы в процессе эксплуатации // Измерительная техника, 1972. №2.
4. ГОСТ 8.586.1,2 – 2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. М.: ИПК Издательство стандартов, 2007.
5. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.