

Гидравлический расчет регулирующей арматуры

В стандартах [1, 2] приведены разные формулы расчета для потоков газа и жидкости. Предлагается их обобщить формулой:

$$Kv = \frac{W}{\sqrt{\Delta p / \Delta p_0 \cdot \rho_0 \rho_1}} \cdot \frac{1}{Y} \quad (1)$$

Kv – пропускная способность м³/час

W – массовый расход потока **не в единицах СИ** [кг/час]

Δp – текущий перепад на местном сопротивлении

Δp_0 – нормирующее значение перепада давления, равно 1 бар = 10⁵ Па

ρ_0 – плотность воды при 15°C, равная 1000 кг/м³

ρ_1 – плотность потока (двухфазная смесь, газ, жидкость)

Y – коэффициент расширения (Expansion factor)

Покажем, что (1) можно использовать как универсальную формулу с учетом ее связи с формулами из стандарта.

Формула для потоков газа, МЭК

Согласно стандарту [1] поток газа рекомендуется считать по формуле:

$$C = \frac{W}{N_6 \sqrt{\Delta p \cdot \rho_1}} \cdot \frac{1}{Y} \quad (2)$$

Перепад давления Δp здесь напрямую задается в барах, т.е. он соответствует $\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0}\right)$ из (1). При этом, если перепад давления задан в барах, то согласно Table 1 [1]:

$$N_6 = 31.6,$$

$$(N_6)^2 = 998,56 \approx \rho_0$$

Тогда:

$$C = \frac{W}{\sqrt{\Delta p / \Delta p_0 \cdot \rho_0 \rho_1}} \cdot \frac{1}{Y}$$

Формула для потоков жидкости, МЭК

Согласно стандарту [1] для потока жидкости рекомендуется рассчитывать объемный расход, а не массовый:

$$C = \frac{Q}{N_1} \cdot \frac{\sqrt{\rho_1 / \rho_0}}{\sqrt{\Delta p}}$$

Как и для газа перепад давления Δp здесь напрямую задается в барах т.е. он соответствует $\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0}\right)$ из (1). При этом, если перепад давления задан в барах, то согласно Table 1 [1] $N_1 = 1$. Учитывая это, а также связь объемного расхода с массовым $Q = W / \rho_1$, запишем:

$$C = \frac{W}{\rho_1} \cdot \frac{\sqrt{\rho_1 / \rho_0}}{\sqrt{\Delta p / \Delta p_0}} = \frac{W}{\sqrt{\Delta p / \Delta p_0 \cdot \rho_0 \rho_1}}$$

Формула совпадает с (1), если принять в ней $Y = 1$.

Формула для потоков газа, ГОСТ

В ГОСТ [2] приведена формула для газа:

$$Kv = \frac{3.57 \cdot 10^4 \cdot Q}{B} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\Delta p}}$$

Q – объемный расход, м³/сек

ρ_1 – плотность газа, кг/м³

Δp – перепад давления, Па

Сопоставим с формулой из [1] для газа, которую перепишем в виде:

$$C = \frac{W}{\sqrt{\rho_1 \Delta p}} \cdot \frac{\sqrt{\Delta p_0 / \rho_0}}{Y}$$

Для этого перейдем к массовому расходу, **причем в пересчете за час вместо секунды:**

$$K_v = \frac{W}{\sqrt{\rho_1 \Delta p}} \cdot \frac{3.57 \cdot 10^4}{3600} \cdot \frac{1}{B}$$

Для точного соответствия требуется выполнение равенства:

$$\frac{\sqrt{\Delta p_0 / \rho_0}}{Y} = \frac{3.57 / 3.6 \cdot 10}{B}$$

Изучение таблиц значений B в [2] дает сомнения в том, что оно точно совпадает с Y , т.к. значения B могут быть меньше 0.667, что указывается как минимальное значение Y в [1]. Кроме того, $3.57/3.6$ лишь приближенно равно единице.

Соответствие формул из стандарта МЭК (IEC)

Проведенный анализ показывает, что все три формулы сводятся к одной обобщенной. Величины K_v в каждой из формул единообразны.

Связь с формулой Вейсбаха

Для жидкости имеем:

$$W = K_v \sqrt{\Delta p / \Delta p_0 \cdot \rho_0 \rho_1}$$

Формула Вейсбаха

$$W = 3600 \sqrt{\frac{2 \rho_1 S^2}{\xi} \Delta P}$$

Приравняем расходы, сократим одинаковые множители:

$$3600S \sqrt{\frac{2}{\xi}} = K_v \sqrt{\rho_0 / \Delta p_0}$$
$$K_v = \frac{S}{\sqrt{\xi}} \underbrace{3600 \sqrt{\frac{2 \Delta p_0}{\rho_0}}}_{5.0912 \cdot 10^4}$$

В формуле Вейсбаха не учитываются потери на расширение газа Y . Поэтому для жидкости соответствие точное, для газа не точное.

Расходные характеристики регулирующей арматуры

Расходная характеристика – зависимость величины K_v от относительного положения регулирующей арматуры u .

Линейная расходная характеристика – одинаковые приросты хода штока u вызывают одинаковые приросты пропускной способности K_v :

$$K_v(u) = K V_0 + (K V_{100} - K V_0) \cdot u$$

Легко убедиться, что

$$K_v(0) = K V_0, K_v(1) = K V_{100}$$

Параболическая расходная характеристика – квадратная зависимость пропускной способности K_v от хода штока:

$$K_v(u) = KV_0 + (KV_{100} - KV_0) \cdot u^2$$

Легко убедиться, что:

$$K_v(0) = KV_0, K_v(1) = KV_{100}$$

Равнопроцентная расходная характеристика – одинаковые приросты хода штока вызывают одинаковые **процентные** приросты относительного хода штока

$$n = \ln(KV_{100}/KV_0)$$

$$K_v(u) = KV_0 \cdot e^{n \cdot u}$$

Можно переписать в виде:

$$K_v = KV_0 \cdot e^{\ln\left(\frac{KV_{100}}{KV_0}\right) \cdot x} = KV_0 \left(\frac{KV_{100}}{KV_0}\right)^x$$

Теперь легко убедиться, что:

$$K_v(0) = KV_0, K_v(1) = KV_{100}$$

Проверим, что формула соответствует своему определению, то есть, выполняется условие:

$$\frac{dK_v(u)}{K_v(u)} = const \cdot du.$$

Продифференцируем:

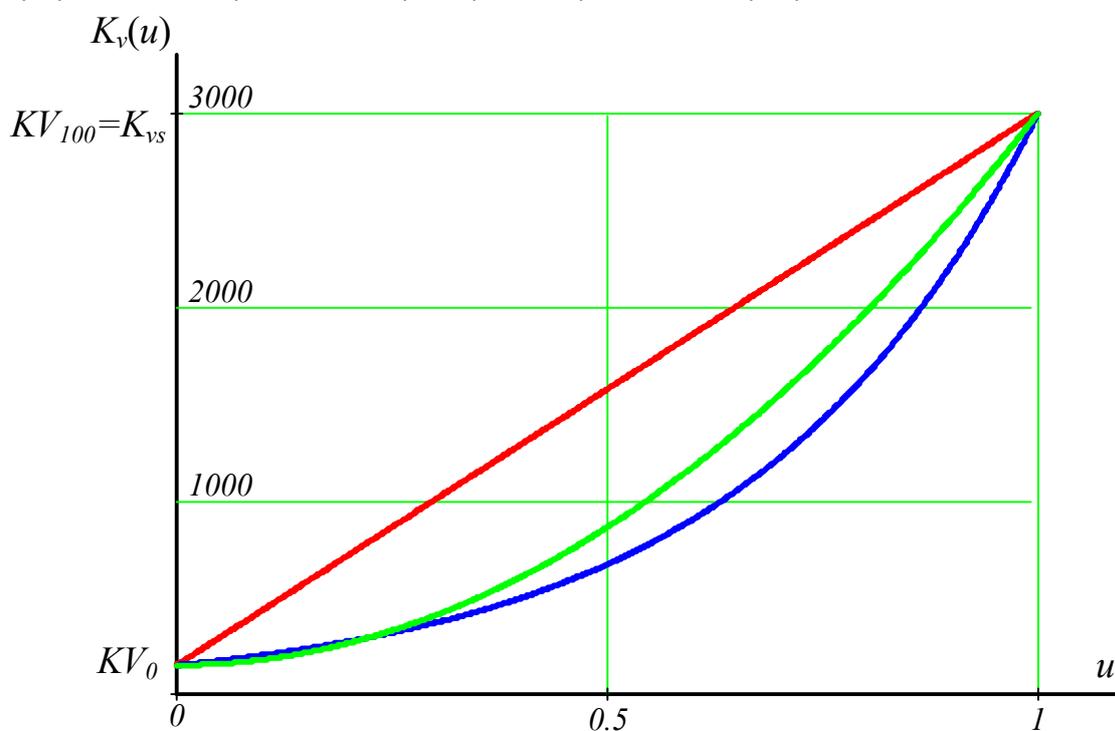
$$\frac{dK_v(u)}{dx} = n \cdot K_v(0) \cdot e^{n \cdot x} = n \cdot K_v(u)$$

$$\frac{dK_v(u)}{K_v(u)} = n \cdot du$$

Специальная характеристика

Встречаются случаи, когда аппроксимация расходной характеристики по типовым зависимостям дает большую погрешность. В этом случае используется полиномиальная аппроксимация $K_v(u)$.

Графики типовых расходных характеристик приведены на рисунке.



Пропускная способность при нулевом ходе штока

В общем случае регулирующая арматура в отличие от запорной пропускает при нулевом положении штока, $K_v(0) \neq 0$. При этом, формулы линейной и параболической характеристик допускают $K_v(0) = 0$. Если же подставить $K_v(0) = 0$ в формулу равнопроцентной характеристики, то получится $K_v(x) = 0$ при любом x .

Максимальная пропускная способность. Относительная пропускная способность

Пропускную способность KV_{100} часто обозначают K_{vs} или K_{Vy} (двойной индекс, условная пропускная способность). Для арматуры одной модельной линейки обычно имеют подобные характеристики подобны, которые различаются только по K_{vs} . В этом случае в документации удобно использовать относительную расходную характеристику:

$$\Phi(u) = \frac{K_v(u)}{K_{vs}}$$

Публикации

1. IEC 60534-2-1, Flow Equations for Sizing Control Valves
2. ГОСТ Р 55508-2013
3. В.Т. Новиков. Основы проектирования и оборудование предприятий органического синтеза. Часть 1. Трубопроводная арматура.-Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013